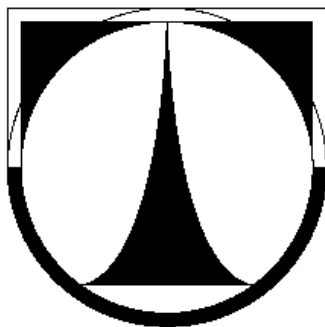


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

---

FAKULTA TEXTILNÍ  
FAKULTA MECHATRONIKY A MEZIOBOROVÝCH INŽENÝRSKÝCH  
STUDIÍ



## **Diplomová práce**

**Vliv zapojení silového obvodu na účinnost asynchronního motoru**

**The influence of integration power circuit on the efficiency of induction  
motor**

**2004**

**Petr Valeš**

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

FAKULTA TEXTILNÍ

FAKULTA MECHATRONIKY A MEZIOBOROVÝCH INŽENÝRSKÝCH  
STUDIÍ

Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů

Obor: 31 – 06 – T Textilní technologie

Zaměření: Řízení technologických procesů

**Vliv zapojení silového obvodu na účinnost asynchronního motoru**

**The influence of integration power circuit on the efficiency of induction  
motor**

**Petr Valeš**

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Eva Konečná, CSc.

Konzultant:

Ing. Jiří Kubín

**Rozsah práce:**

Počet stran: 70

Počet grafů: 57

Počet tabulek: 15

Počet obrázků: 16

Počet příloh: 3 + CD ROM

Datum: 5. ledna 2004

## **Anotace**

Cílem diplomové práce je zhodnotit vliv zapojení silového obvodu na účinnost asynchronního motoru.

První část je zaměřená na porovnání chování asynchronního motoru napájeného sinusovým síťovým napětím oproti napájení nesinusovým napětím z měniče kmitočtu.

V druhé části je provedeno měření asynchronního motoru napájeného měničem kmitočtu při různých změnách frekvence přiváděného napětí, změně zatížení a modulační frekvence podle českých norem. Ověření účinnosti zapojení vstupního a výstupního pasivního filtru. Výpočet obsahu vyšších harmonických a elektrických veličin na vstupu a výstupu měniče kmitočtu.

## **Annotation**

The aim of the diploma work is to valorize the influence of integration power circuit on the efficiency of induction motor

The first part is dedicated to the comparison of conduct induction motor supply by sinusoidal line voltage contrary to supply by not sinusoidal voltage from frequency converter.

The second part of this work contains the measure of induction motor supply by frequency converter during various changes of frequency impressed voltage, the change of stress and modulation frequency according to the Czech norms. Verify the efficiency of integration input and output passive filter. The calculation contents of higher harmonic and electric quantities on input and output of frequency converter.

### **Místopřísežné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedených přístrojů a literatury.

V Liberci dne 5. ledna 2004

.....

podpis

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užití své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci dne 5. ledna 2004

.....  
podpis

## **Poděkování**

Chtěl bych touto cestou poděkovat především vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Evě Konečné, CSc. za odborné vedení a pomoc při zpracování diplomové práce. Dále mé poděkování patří Ing. Janu Václavíkovi a Ing. Miroslavu Novákovi za poskytnuté informace a velmi cenné rady.

V neposlední řadě chci poděkovat celé mé rodině a přítelkyni za všestrannou podporu při mém studiu na vysoké škole a při tvorbě této diplomové práce.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	8
1. Úvod .....	10
1.1 Cíl práce .....	11
2. Podrobné seznámení s vlastnostmi asynchronního motoru napájeného z měniče frekvence .....	11
2.1 Asynchronní motor .....	11
2.1.1 Charakteristiky asynchronního motoru .....	12
2.1.2 Řízení rychlosti .....	13
2.2 Měnič frekvence .....	14
2.2.1 Nepřímý měnič kmitočtu s napětovým meziobvodem .....	14
2.2.2 Měnič jako zdroj rušení .....	16
2.3 Asynchronní motor napájený z měniče frekvence .....	17
2.3.1 Regulace otáček .....	18
2.3.2 Harmonické zkreslení .....	18
2.4 Elektromagnetická kompatibilita .....	20
2.4.1 Druhy elektromagnetického rušení, zdroje a způsoby šíření .....	21
2.4.2 Normalizace požadavků na EMC .....	23
3. Porovnání chování ASM napájeného ze sítě oproti napájení z měniče frekvence .....	24
4. Experimentální část .....	28
4.1 Popis měřicího pracoviště .....	28
4.1.1 Schéma zapojení měřicího pracoviště .....	30
4.1.2 Měřená zařízení .....	31
4.2 Měření asynchronního motoru napájeného z měniče frekvence .....	32
4.2.1 Měřicí zařízení Ethernet Multifunction Unit EMU2 a sonda LEM PR 200 .....	33
4.2.2 Měření bez vstupního a výstupního filtru .....	34
4.2.3 Měření se vstupním filtrem .....	35
4.2.4 Měření s výstupním sinusovým filtrem .....	37
4.2.5 Měření se vstupním filtrem a s výstupním filtrem .....	38
4.2.6 Měření při propojení frekvenčního měniče a ASM dlouhým napájecím kabelem .....	38
4.2.7 Harmonická analýza .....	40
4.2.8 Výpočty elektrických výkonových parametrů .....	43
5. Výsledky experimentu .....	45
5.1 Porovnání vstupních harmonických při různých napájecích frekvencích .....	45
5.2 Porovnání vstupních harmonických při různých modul. frekvencích .....	49
5.3 Porovnání vstupních harmonických při různém zatížení .....	52
5.4 Shoda s normami ČSN .....	57
5.4.1 ČSN EN 61000-2-4 .....	57
5.4.2 ČSN EN 61000-3-2 .....	57
5.5 Porovnání elektrických výkonových parametrů .....	59
6. Diskuse výsledků .....	62
7. Závěr .....	64
8. Použitá literatura .....	65
9. Seznam příloh .....	67

## Seznam použitých zkratek a symbolů

ASM		asynchronní motor
ČSN		česká technická norma
EMC		elektromagnetická kompatibilita
EN		evropská norma
EU		Evropská unie
FFT		rychlá Fourierova transformace
MF		měníč frekvence
PWM		pulsně-šířková modulace
SSM		stejnoseměrný motor
VPS		výkonové polovodičové součástky

C	[F]	kapacita
CF	[-]	Crest Factor – vrcholový činitel
f	[Hz]	frekvence
f <sub>1</sub>	[Hz]	frekvence napájecího napětí
f <sub>2</sub>	[Hz]	frekvence rotorového napětí
h	[-]	řád vyšší harmonické
i	[A]	okamžitá hodnota proud
i <sub>h</sub>	[-]	poměrná hodnota h-té harmonické proudu
I <sub>ef</sub>	[A]	efektivní hodnota proudu
I <sub>h</sub>	[A]	h-tá harmonická proudu
I <sub>max</sub>	[A]	maximální hodnota proud
I <sub>n</sub>	[A]	jmenovitý proud
k <sub>V1</sub>	[-]	činitel vinutí ve statoru
k <sub>V2</sub>	[-]	činitel vinutí v rotoru
L	[H]	indukčnost
n	[ot/min]	skutečné otáčky rotoru
n <sub>s</sub>	[ot/min]	synchronní otáčky rotoru
N <sub>1</sub>	[-]	počet závitů v jedné fázi statorového vinutí
N <sub>2</sub>	[-]	počet závitů v jedné fázi rotorového vinutí
p	[-]	počet pólových dvojic
P	[W]	činný výkon



$Q$	[VAr]	jalový výkon
$R_1$	[ $\Omega$ ]	odpor statorového vinutí
$R'_2$	[ $\Omega$ ]	odpor rotorového vinutí přepočtený na stator
$s$	[-]	skluz
$S$	[VA]	zdánlivý výkon
$t$	[s]	čas
$T$	[s]	perioda
THD	[-]	Total Harmonic Distortion – harmonické zkreslení
THF	[-]	Total Harmonic Factor – činitel harmonických
$u$	[V]	okamžitá hodnota napětí
$u_h$	[-]	poměrná hodnota h-té harmonické napětí
$U_{ef}$	[V]	efektivní hodnota napětí
$U_h$	[V]	h-tá harmonická napětí
$U_{max}$	[V]	maximální hodnota napětí
$U_n$	[V]	jmenovité napětí
$U_{1f}$	[V]	indukované napětí ve statoru
$U_{2f}$	[V]	indukované napětí v rotoru
$U_{20f}$	[V]	indukované „klidové“ napětí v rotoru
$X_{1\sigma}$	[ $\Omega$ ]	rozptylová reaktance statorového vinutí
$X'_{2\sigma}$	[ $\Omega$ ]	rozptylová reaktance rotor. vinutí přepočítaná na stator
$\lambda$	[-]	Power Factor - účinník
$\Phi$	[Wb]	magnetický indukční tok
$\omega$	[rad/s]	skutečná úhlová rychlost rotoru
$\omega_s$	[rad/s]	synchronní úhlová rychlost rotoru

# 1. Úvod

V současnosti nejčastěji používaný typ elektromotoru je asynchronní motor. Je to dáno především jeho dobrými provozními vlastnostmi, možností použití v širokém výkonovém rozsahu pro většinu aplikací a jednoduché konstrukci, která zvyšuje provozní spolehlivost. Proto jsou v průmyslových aplikacích velmi často elektrické regulační i neregulační pohony realizované jako střídavé. Hnacímotorem je asynchronní s kotvou nakrátko, napájený většinou z napěťového měniče frekvence mnohdy i v těch případech, kdy není nutná regulace otáček.[1]

S rozvojem polovodičových měničů se asynchronní motory začaly používat v aplikacích, kde je třeba plynule měnit rychlost, a to v celém nebo částečném rychlostním rozsahu. Nejvýznamnějším způsobem řízení je řízení frekvenční. Frekvenčně řízené asynchronní motory se dnes používají k pohonu takových pracovních mechanismů, kde se dříve používal výhradně stejnosměrný regulační pohon.[2]

Měnič frekvence jako polovodičové elektronické zařízení způsobuje narůstající počet provozních obtíží, kterými jsou hlavně vzájemné ovlivňování s jinými elektrickými zařízeními, generování harmonických proudů do napájecí soustavy, negativní vliv na připojený motor, vysokofrekvenční působení měničů na sdělovací a zabezpečovací zařízení.[3]

Jevy vznikající na výstupu měničů kmitočtu jsou v současné době velkým problémem a jejich eliminace tak, aby neohrožovaly jakýmkoliv způsobem okolní zařízení, je značně obtížná. Celý regulovaný elektrický střídavý pohon musí být navržen se zohledněním nových norem pro splnění podmínek elektromagnetické kompatibility daného zařízení, neboť každé takové výkonové zařízení může být zdrojem potenciálního rušení, kterým může nežádoucím způsobem ovlivňovat jiné technické systémy ve svém okolí. A dále by nemělo ohrožovat zařízení, která jsou samotnou součástí daného elektrického pohonu.

Možnou metodou, jak toto nebezpečí snížit, je použití pasivních výstupních filtrů a filtračních tlumivek na svorkách měniče, což má za následek snížení strmosti náběhu a doběhu napěťových pulsů na svorkách motoru, tedy snížení obsahu vyšších harmonických ve výstupním napětí, omezení napěťových překmitů a snížení ztrát v motoru vlivem odfiltrování vysokofrekvenčních proudů.[4]

## 1.1 Cíl práce

Cílem této práce je podrobně se seznámit s vlastnostmi asynchronního motoru s kotvou nakrátko napájeného z měniče frekvence, tj. porovnat chování asynchronního motoru napájeného sinusovým napětím s frekvencí 50Hz oproti napájení nesinusovým napětím z měniče frekvence při skalárním a vektorovém řízení. Významné je také změření harmonických spekter proudu a napětí na vstupu a výstupu měniče frekvence při různém nastavení velikostí modulačních frekvencí v měniči, různé zátěži a různé frekvenci přiváděného napětí. Ověřit účinnost zapojení vstupního a výstupního filtru frekvenčního měniče při tomto různém nastavení.

## 2. Podrobné seznámení s vlastnostmi asynchronního motoru napájeného z měniče frekvence

Vzhledem k tomu, že se práce zabývá vlivem zapojení silového obvodu s měničem frekvence na účinnost asynchronního motoru, je v této části popsán asynchronní motor s kotvou nakrátko, frekvenční měnič, asynchronní motor napájený z měniče frekvence a elektromagnetická kompatibilita.

### 2.1 Asynchronní motor

Asynchronní motory (ASM) jsou konstrukčně tvořeny dvěma vícefázovými systémy vinutí, vázanými vzájemnou magnetickou vazbou. Jsou to tedy střídavé nejčastěji trojfázové motory, které se konstruují se symetricky rozloženým statorovým vinutím. Provedení rotorového vinutí je závislé na druhu stroje. Vzájemné indukčnosti vinutí statoru a rotoru se s časem mění díky otáčení cívek rotoru vůči cívkám statoru.[1]

V praxi se můžeme setkat s asynchronním motorem nakrátko a asynchronním motorem kroužkovým. Oba druhy asynchronních motorů se většinou používají s logickým řízením rozběhu, brzdění, reverzace apod.[2]

Asynchronní motor s kotvou nakrátko je nejrozšířenější ve střídavých pohonech. Má jednoduchou a robustní konstrukci, je výrobně i provozně poměrně levný. Umožňuje přímé napájení z rozvodné sítě a je proveden tak, že může pracovat v libovolném prostředí. Je to nejjednodušší elektrický motor s vinutím rotoru ve tvaru klece, která se vytvoří spojením všech tyčí v drážkách čelními kovovými kruhy nakrátko.[5]

### 2.1.1 Charakteristiky asynchronního motoru

V motoru vzniká točivé magnetické pole, které je buzeno proudem ve vinutí statoru z trojfázové sítě o stálém napětí. Při daném sledu fází má toto pole jeden smysl otáčení ve vzduchové mezeře a stálou rychlost zvanou synchronní, vyjádřenou rovnicí

(2.1)

$$\text{resp.} \quad \begin{aligned} \omega_s &= \frac{2\pi f_1}{p} \quad [\text{rad} / \text{s}; \text{Hz}] \\ n_s &= \frac{60 f_1}{p} \quad [\text{ot} / \text{min}; \text{Hz}] \end{aligned} \quad (2.2)$$

kde:  $\omega_s$  - synchronní úhlová rychlost rotoru,  
 $n_s$  - synchronní otáčky rotoru,  
 $p$  - počet pólových dvojic [-],  
 $f_1$  - frekvence napájecího napětí [Hz].

Přepojením dvou fází v přívodu se mění sled fází a tím i smysl otáčení točivého pole. Velikost pole je úměrná vnitřnímu napětí, jež je při zatížení o úbytek napětí ve statorovém vinutí menší než napětí sítě. U malých motorů asi o 3% až 4%, u velkých motorů asi o 1,5% až 2,5%. Pro zjednodušení výpočtů zanedbáváme tento malý rozdíl a považujeme tok za stálý a nezávislý na zatížení.

Za předpokladu sinusově rozloženého pole v rozteči dvou pólů a časově sinusové změny toku se v každé fázi statorového vinutí indukuje napětí dané rovnicí

$$U_{1f} = 4,44 f_1 k_{v1} N_1 \Phi \quad [\text{V}] \quad (2.3)$$

kde:  $k_{v1}$  - činitel vinutí ve statoru [-],  
 $N_1$  - počet závitů v jedné fázi statorového vinutí [-],  
 $\Phi$  - magnetický indukční tok [Wb].

Je-li rotor zajištěn proti otáčení, prochází jeho magnetickým obvodem tok  $\Phi$  o stejném kmitočtu  $f_1$ . Jako ve statoru i v každé fázi rotorového vinutí se indukuje „klidové“ napětí (ve stojícím rotoru – jako v transformátoru)

$$U_{20f} = 4,44 f_1 k_{v2} N_2 \Phi \quad [\text{V}] \quad (2.4)$$

kde:  $k_{v2}$  - činitel vinutí v rotoru [-],  
 $N_2$  - počet závitů v jedné fázi rotorového vinutí [-].

V normálním chodu motoru je rotorové vinutí uzavřeno buď nakrátko (jako klec nebo kroužky rotoru spojené nakrátko) nebo u kroužkového motoru přes zařazené odpory. Působením indukovaného napětí procházejí rotorovým vinutím proudy, jež v záběru

s magnetickým polem vyvolávají točivý moment, který se snaží otáčet ve směru točivého pole ve vzduchové mezeře.

Otáčí-li se rotor „po poli“, tj. ve stejném směru jako magnetické pole, klesá jeho relativní rychlost proti točivému poli a tím klesá i kmitočet změny toku  $f_2$  v rotorovém obvodu, až by při ideální synchronní rychlosti klesl na 0. S použitím známého vztahu pro skluz

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [-] \quad (2.5)$$

se odvodí vztah pro poměr síťového a rotorového kmitočtu

$$f_2 = sf_1 \quad [Hz] \quad (2.6)$$

kde:  $\omega$  - skutečná úhlová rychlost rotoru,

$n$  - skutečné otáčky rotoru.

Indexy 1 se vztahují na stator, indexy 2 na rotorové obvody. Indukované napětí v rotoru je dáno vztahem

$$U_{2f} = 4,44 f_2 k_{v2} N_2 \Phi \quad [V]$$

a použitím rovnic (2.4 a 2.6) dostaneme

$$U_{2f} = 4,44 sf_1 k_{v2} N_2 \Phi = s U_{20f} \quad [V] \quad (2.7)$$

[5]

### 2.1.2 Řízení rychlosti

Použitím rovnic (2.1 a 2.2) pro rychlost asynchronního motoru platí

$$\omega = \omega_s (1 - s) = \frac{2\pi f_1}{p} (1 - s) \quad [rad / s; Hz] \quad (2.8)$$

Z rovnice (2.8) vyplývají tyto možnosti řízení rychlosti:

- změnou počtu pólových dvojic lze stupňovitě řídit rychlost motoru,
- změnou skluzu lze dosáhnout plynulé změny rychlosti, přičemž skluz lze při daném zátěžném momentu měnit změnou napětí statoru, rotorového odporu nebo lze měnit skluz v tzv. kaskádním spojení,
- změnou statorové frekvence lze měnit rychlost plynule.[2]

## 2.2 Měníč frekvence

Úkolem měniče frekvence (MF) je měnit sinusové napětí konstantní frekvence, odebírané z napájecí sítě, na napětí proměnné frekvence, čímž dosahujeme plynulého řízení otáček motoru.

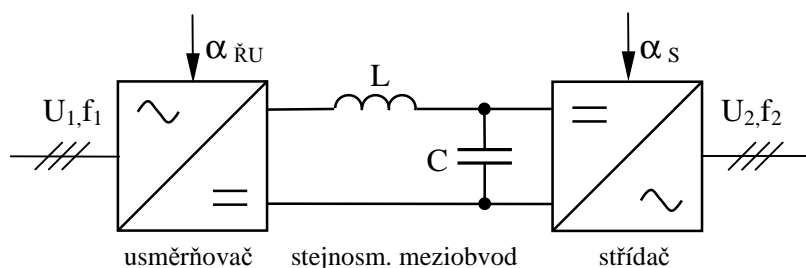
Pro dobré využití asynchronního motoru musíme zpravidla se změnou frekvence měnit i efektivní hodnotu napájecího napětí. Těchto změn se dosahuje vhodným sledem spínání jednotlivých polovodičových součástek měniče, tzn. časovým vzorkováním napětí a proudu měniče.[6]

Měníče jsou elektrické obvody s nelineárními součástkami. Přeměna energie na jiné parametry výstupního napětí, proudu, frekvence apod. se děje s minimálními ztrátami a tím vysokou účinností. Využívají se k řízení motoru změnou frekvence (kmitočtu) satorového napětí a k řízení motorů v kaskádě. Lze je rozlišit na:

- nepřímé měniče kmitočtu (se stejnosměrným meziobvodem)
  - nepřímé měniče kmitočtu s napěťovým střídačem
  - nepřímé měniče kmitočtu s proudovým střídačem
- přímé měniče (cyklokonvertory).

### 2.2.1 Nepřímý měnič kmitočtu s napěťovým meziobvodem

Nepřímý měnič kmitočtu se skládá z usměrňovače (zpravidla připojeného přes transformátor na rozvodnou síť), který vstupní střídavé napětí a střídavý proud o síťovém kmitočtu  $f_1$  usměrní, a ze střídače, který usměrněné napětí a proud rozstřídá na požadovaný kmitočet  $f_2$ . Stejnosměrný meziobvod od sebe odděluje oba střídavé obvody – vstupní a výstupní. Tím je umožněno řízení výstupního kmitočtu zcela nezávisle na kmitočtu vstupním,[7],obr.č.01.



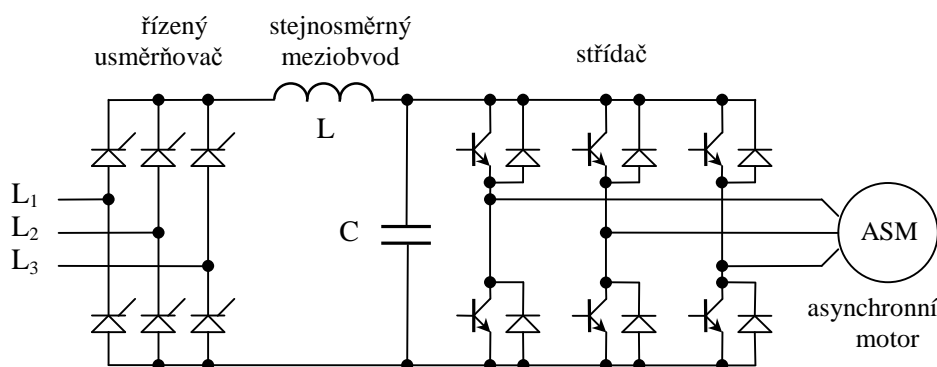
Obr.č.01: Blokové schéma nepřímého měniče frekvence s napěťovým meziobvodem

**Usměrňovač** (v poslední době řízený) je zdrojem stejnosměrného proudu a napětí pro stejnosměrný meziobvod. Při napájení z trojfázové napájecí sítě se používá nejčastěji řízený

3-fázový můstkový usměrňovač. Změnou úhlu sepnutí  $\alpha_{RU}$  tyristorů usměrňovače se může řídit výstupní napětí usměrňovače a tím také efektivní hodnota výstupního střídavého napětí měniče, obr.č.02.

**Stejnoseměrný napěťový meziobvod** obsahuje filtrační kondenzátor  $C$  s poměrně velkou (až jednotky tisíc  $\mu F$ ) kapacitou. Tím je také určeno, že stejnosměrný obvod se vzhledem ke střídači chová jako zdroj napětí. Spolu s tlumivkou  $L$  tvoří kondenzátor vstupní vnitřní filtr napěťového střídače. Tlumivka  $L$  vyhlazuje proud z usměrňovače.[7]

**Výstupní střídač** reguluje změnou řídicího úhlu  $\alpha_S$  a dobou vodivosti tyristorů střídače frekvenci výstupního napětí a proudu.



Obr.č.02: Schéma nepřímého měniče frekvence s napěťovým meziobvodem

Pokud má mít při každé frekvenci do 50Hz motor stejný moment zvratu, musí se se změnou  $f_1$  měnit i výstupní napětí střídače tak, aby zůstal zachovaný konstantní poměr  $U_{1f}/f_1$ . Tehdy je stálý i magnetický tok  $\Phi$  statoru, protože z rovnice (2.3) pro indukované napětí motoru vyplývá:

$$\Phi = \frac{1}{4,44 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} \frac{U_{1f}}{f_1} = Konst. \cdot \frac{U_{1f}}{f_1} \quad [Wb] \quad (2.9)$$

Konstantního magnetického toku lze dosáhnout dvěma způsoby regulace:

**1. Amplitudová regulace** - kdy na vstupu měniče je řízený usměrňovač, který reguluje velikost napětí ve stejnosměrném meziobvodu. Střídač je napájen regulovaným napětím, jehož velikost se mění podle výstupní frekvence střídače tak, aby  $U_{1f}/f_1$  bylo konstantní.

**2. Pulsně-šířková modulace (PWM)** - na vstupu měniče je neřízený usměrňovač, takže stejnosměrný meziobvod má konstantní napětí. Změna výstupního napětí měniče se děje přímo ve střídači *pulsně-šířkovou modulací*, obr.č.05. Výsledné střídavé napětí se skládá z lichoběžníků (téměř obdélníků) s proměnnou střídou i kmitočtem. Pro signál modulovaný pulsně-šířkově musí platit, že perioda je konstantní. Vhodnou volbou šířky impulsů je možné

dosáhnout optimální přenos energie do zátěže. Optimální regulací je také možné dosáhnout nízkého obsahu vyšších harmonických ve výstupním napětí, případně vyloučení některých harmonických.[8]

Regulační struktury řízení střídačů prodělaly v poslední době mohutný rozvoj, směřující od *skalárních* metod k metodám založeným na *vektorové orientaci* a *přímým* metodám řízení.

Skalární způsob řízení měničů frekvence je principiálně jednoduchý. Neumožňuje však dosáhnout špičkových dynamických parametrů pohonů. Je užíván již jen ve starší generaci pohonů, případně v jednodušších aplikacích. Tento skalární způsob řízení lze rozdělit do dvou skupin:

- řízení s konstantním poměrem napětí/frekvence,
- řízení statorového proudu a skluzové frekvence

Pro dynamicky náročné pohony je metoda vektorového řízení. Požadovaný moment asynchronního motoru je tu dosažen na sobě nezávislým řízením momentové a tokové složky proudu. Metoda je založena na rychlém měření okamžitého proudu, napětí, magnetického toku a výpočtu parametrů motoru, aby v každém okamžiku bylo možno rozhodnout, jak je nutno v příštím okamžiku sepnout prvky střídače. Metoda je prakticky realizovatelná jen s velmi výkonnou technikou, která je schopna tak rychlé měření a výpočty zvládnout. Řízení rozdělujeme na:

- přímé (rekonstruuje vektor magnetického toku ze statorového napětí a proudu),
- nepřímé (počítá pouze skluz – snímač polohy).

Přímou metodou je metoda přímého řízení momentu (DSR).[9]

## 2.2.2 Měnič jako zdroj rušení

Z principu funkce jsou měniče i silnými zdroji rušení, proto je dobré si uvědomit vlastnosti měničů a poznat, jak toto rušení vzniká. Základním stavebním prvkem měničů jsou výkonové polovodičové součástky (VPS), které dle stupně řízení dělíme na:

- neřízené (nejčastěji diody),
- řízené (řízené sepnutí součástky – například thyristory),
- plně řízené (řízený spínací i vypínací proces).

Parametry a druh polovodičových součástek a typ řízení měniče mají základní vliv i na úroveň generovaného rušení měniče. Obecně rušení, jehož zdrojem je zařízení s VPS, vzniká z těchto příčin:

- nesinusovým odběrem proudu, vyvolávajícím deformaci napájecího napětí (nf rušení),
- přechodovými jevy při sepnutí a vypnutí VPS (vf rušení),



- pronikáním vf složek řídicích signálů, generovaných v řídicích obvodech zařízení s řízenými VPS (vf rušení).

Příčinou vzniku nf rušení při činnosti zařízení s VPS je to, že proud a napětí na zátěži jsou nesinusové funkce času a obsahují vyšší harmonické. Díky nesinusovému odebíranému proudu vznikají na impedancích sítě nesinusové složky úbytku napětí, které deformují křivku napájecího napětí a projevují se jako rušivé střídavé napětí superponované na základní harmonické napětí.

Hlavní příčinou vzniku vf rušení od zařízení s VPS je jejich fyzikální vlastnost, a to náhlá změna impedance při přechodu VPS z nevodivého stavu do vodivého, a naopak. Přitom v důsledku přerozdělení energií akumulovaných v reaktancích celého obvodu vznikají přechodná napětí a proudy, jejichž kmitočtová spektra sahají až do oblasti desítek MHz a které působí jako nežádoucí vf rušení.

Z uvedeného je zřejmé, že vznik rušení je neoddelitelně spjat se základními vnitřními pochody v měniči, které jsou dány vlastnostmi VPS a typem řízení měniče. Světový trend jde směrem k úplnému nahrazení tyristorů jako polovičně řízených VPS vypínatelnými součástkami a užíváním jediné univerzální metody řízení měničů – k PWM. Řízené usměrňovače s tyristory a fázovým řízením – dožívají, utlumují se a jsou vytlačovány měniči s tranzistory a PWM, které mají malé ztráty, vysokou účinnost, rychlou odezvu při regulaci měniče.[9]

## 2.3 Asynchronní motor napájený z měniče frekvence

V běžných jednoduchých aplikacích je klasická konfigurace střídavého pohonu: neřízený síťový diodový usměrňovač – stejnosměrný napěťový meziobvod – střídač – asynchronní motor s kotvou nakrátko.

Použití měničů kmitočtu spolu s různými citlivými přístroji, např. na letištích, v nemocnicích nebo výzkumných ústavech, klade specifické požadavky na měniče kmitočtu, zejména s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu.

V měničích kmitočtů vzniká vysokofrekvenční rušení zejména spínáním polovodičových součástek (převážně IGBT) ve střídači s výslednými strmými spínacími impulsy IGBT.

Velikost rušení závisí na různých faktorech:

- impedanci v napájecí síti,
- frekvenci spínání a spínacích impulsích střídače,
- mechanické konstrukci měniče kmitočtu,

- použitých opatřeních k odstranění poruch.

Aby byla dodržena směrnice o elektromagnetické kompatibilitě (EMC), musí měniče kmitočtu obsahovat zabudovaný filtr pro odrušení, nebo musí být společně s měničem kmitočtu instalován externí filtr dle normy ČSN EN 61800-3.[10]

### 2.3.1 Regulace otáček

Pokud je třeba při provozu regulovat otáčky motoru napájeného měničem frekvence, to znamená měnit momentovou charakteristiku motoru, podle rovnice  $M=f(n)$ ,

$$M = \frac{3}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_{1f}^2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right) + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})} \cdot \frac{R'_2}{s} \quad [Nm] \quad (2.10)$$

kde:  $R_1$  – odpor statorového vinutí  $[\Omega]$ ,

$R'_2$  – odpor rotorového vinutí přepočtený na stator  $[\Omega]$ ,

$X_{1\sigma}$  - rozptylová reaktance statorového vinutí  $[\Omega]$ ,

$X'_{2\sigma}$  - rozptylová reaktance rotor. vinutí přepočítaná na stator  $[\Omega]$ ,

je to možné pouze změnou frekvence napájecího napětí  $f_1$  pomocí měniče nebo změnou zátěžného momentu  $M$ . Jiné parametry pohonu nelze měnit (pokud není brána do úvahy změna napájecího napětí  $U_1$  např. předřazeným transformátorem v přívodu motoru). Jedinou další veličinou, kterou může obsluha v měniči nastavit, je spínací (modulační) frekvence  $fs$ . [3]

### 2.3.2 Harmonické zkreslení

Nelineární zátěže připojené k elektrickému zdroji vyvolávají harmonická zkreslení. Běžné nelineární zátěže zahrnují motorové spouštěče, regulované pohony, počítače a jiná elektrická zařízení. Z těchto zařízení asi největší pozornost vyžadují regulované pohony, částečně kvůli přísným normám, v nedávné době uvedeným v platnosti.

Všechny výkonové měniče, používané v rozličných typech regulovaných pohonů, mohou zvýšit rušení napájecí sítě zkreslením průběhu napájecího proudu injektáží harmonických do napájecí sítě.[11]

V elektrorozvodné síti nepříznivě působí především vyšší harmonické, které na impedanci sítě způsobují zkreslení průběhu napětí. Pro možnost posouzení velikosti harmonické se zavádí *poměrná hodnota h-té harmonické*. Ta je definována jako poměr efektivní hodnoty  $h$ -té harmonické a efektivní hodnoty základní harmonické. Často jsou poměrné hodnoty harmonických udávány v procentních jednotkách.

$$(2.11) \quad u_h = \frac{U_h}{U_1} \quad [-] \quad u_{h\%} = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$i_h = \frac{I_h}{I_1} \quad [-] \quad i_{h\%} = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.12)$$

ČSN EN 61800-3 udává celkové harmonické zkreslení THD (total harmonic distortion) a celkového činitele harmonických THF (total harmonic factor), vyjádřeny vztahem

$$THD = \frac{\sqrt{Q^2 - Q_1^2}}{Q_1} \quad [-] \quad (2.13)$$

$$THF = \frac{\sqrt{Q^2 - Q_1^2}}{Q} \quad [-] \quad (2.14)$$

kde:  $Q_1$  - efektivní hodnota základní harmonické [V],[A],  
 $Q$  - celková efektivní hodnota [V],[A].[12]

Harmonické zkreslení lze ještě definovat poměrně jednodušším způsobem, který vychází z předpokladu, že největší zkreslení způsobují velké a časově strmé průběhy. Je to zejména případ usměrňovačů s vyhlazovacím kondenzátorem. Dalším předpokladem, o kterém bylo pravděpodobně uvažováno je i to, že na přenosu energie se podílí především plocha pod křivkou  $i(t) = f(t)$ . Potom definují harmonické zkreslení pomocí parametru nazývaného **Crest Factor** (vrcholový činitel). Je určen jako poměr špičkové hodnoty proudu  $I_{max}$  odebíraného ze sítě k jeho efektivní hodnotě. Tento popis nevystihuje tvar průběhu proudu.

$$(2.15) \quad CF = \frac{I_{max}}{I_{ef}} \quad [-]$$

kde:  $I_{max}$  - maximální hodnota naměřeného proudu [A]  
 $I_{ef}$  - efektivní hodnota naměřeného proudu [A].

Je zřejmé, že pro harmonický proud je *Crest Factor* roven  $\sqrt{2}$ . Podle výše uvedené definice platí, že proud je neharmonický jestliže  $CF > \sqrt{2}$ . Hlavní výhodou této definice je to, že vrcholový činitel je snadno měřitelný a vyčíslitelný, například pomocí osciloskopu, třebaže neposkytuje přesný popis harmonického zkreslení.[13]

Velikost skutečného zkreslení závisí na impedanci napájecího transformátoru, na způsobu instalace rozvodů a rovněž na druhu, počtu a výkonu připojených nelineárních zátěží.

Zatížení vyššími harmonickými vyvolané měniči kmitočtu je důležitým hlediskem při navrhování zařízení. Je proto důležité, aby měniče kmitočtu obsahovaly příslušný vnitřní nebo externí filtr pro omezení amplitudy vyšších harmonických. Tím lze preventivně zabránit poruchám jiných spotřebičů připojených do stejné sítě. Jsou dva základní typy filtrů:

- pasivní
- aktivní

Pasivní filtry obsahují sérii obvodů LC laděných na harmonickou, kterou mají odfiltrout. Aktivní filtr představuje dodatečný výkonový elektronický měnič připojený k nelineární zátěži. Vstupní proud měniče je řízen tak, aby produkoval stejné úrovně harmonických jako nelineární zátěž, avšak v opačné fázi. Tyto dvě úrovně harmonických se v bodě spojení navzájem eliminují.[12]

Zpětné působení na síť (tj. podíl vyšších harmonických) lze snížit omezením amplitudy impulsních proudů (nabíjecí proudy kondenzátorů). V praxi se k tomu používají tlumivky zapojené buď v napěťovém meziobvodu, nebo na vstupu měniče kmitočtu.[10]

## 2.4 Elektromagnetická kompatibilita

Technické zařízení vykazuje mimo své řádné funkce, pro které je konstruováno, mnohdy i některé nežádoucí interakce se svým okolím. Hlavními i vedlejšími produkty své činnosti může nepříznivě ovlivňovat (rušit) činnost jiných zařízení či systémů ve svém okolí, a naopak může být působením svého okolí rušeno. Výjimkou není ani stav, kdy zařízení ruší svými vlastními produkty i své vlastní funkce.

U elektrických či elektronických zařízení mohou být uvedené vzájemné interakce zprostředkovány elektromagnetickými rušivými signály, což je označováno jako elektromagnetické rušení. V současném vývoji těchto zařízení lze rozpoznat některé dlouhodobé tendence, vyvolané především neustále rostoucími nároky na rozšiřování a zdokonalování jejich funkcí:

- zvyšování parametrů elektrotechnických (zejména výkonových polovodičových) systémů, tj. nárůst instalovaného výkonu, zpracování stále vyšších napětí, proudů a kmitočtů spolu s rostoucími nároky na rychlost jejich zpracování,

- zvyšování kompaktnosti systémů, což má za následek rozměrovou koncentraci a prostorové přibližování systémů různého charakteru, vzájemně spolupracujících i funkčně zcela oddělených,
- vzrůst požadavků na funkci informačních systémů spojený s rostoucí integrací obvodů a součástek a tedy s požadavkem snižování výkonových ztrát a výkonových úrovní nositelů informace, vzrůstající nároky na přesnost rozlišování úrovní i časových průběhů zpracovávaných signálů,
- vytváření rozsáhlých informačních sítí, vyvolávající nutnost rychlého a spolehlivého přenosu velkých objemů dat i na značné vzdálenosti mezi odlehlými řízenými systémy.

Každá z těchto tendencí je sama o sobě technicky plně zdůvodnitelná a spojená s naprosto logickými požadavky, nicméně při jejich současném působení vznikají závažné problémy vyvolané nežádoucím vzájemným elektromagnetickým ovlivňováním jednotlivých elektrických a elektronických zařízení. Intenzita elektromagnetických rušivých signálů v prostředí narůstá a provozovaná zařízení jsou k jejich vlivu stále citlivější. Tím je charakterizována aktuální problematika bezporuchové koexistence, vzájemné slučitelnosti - EMC.[14]

### 2.4.1 Druhy elektromagnetického rušení, zdroje a způsoby šíření

Elektromagnetické rušení je zpravidla vyvoláno činností elektrických přístrojů, zařízení či systémů. Jeho příčinou může být:

- elektromagnetický jev jako žádoucí užitečný produkt činnosti, který pronikl do nepatřičných míst elektromagnetického okolí a chová se tam jako nežádoucí signál (např. užitečný signál radiotelefonu rušící činnost zabezpečovacího systému objektu, elektromagnetické pole unikající z pracovního prostoru zařízení pro vysokofrekvenční ohřev),
- elektromagnetický jev jako nežádoucí vedlejší produkt činnosti (např. vyšší harmonické proudu vznikající při činnosti polovodičového měniče, přepětí při spínání zátěží v rozvodné síti, rádiové rušení vyvolané jiskřením komutátoru elektromotoru).

Kromě těchto umělých zdrojů existují i přírodní zdroje elektromagnetického rušení, jako např. atmosférické výboje.

Od zdroje k rušenému objektu se elektromagnetické rušení šíří:

- po vodičích (silových nebo datových) jako elektrické napětí resp. proud,
- prostorem jako elektromagnetické pole, definované elektrickou složkou (intenzita el. pole ve V/m) nebo magnetickou složkou (intenzita magnetického pole v A/m).

Základním kritériem pro klasifikaci jednotlivých druhů elektromagnetického rušení je umístění v kmitočtovém spektru. Takto dělíme rušení na nízkofrekvenční, vysokofrekvenční (rádiové) a impulsní - obr.č.03.[14]



*Obr.č.03: Druhy elektromagnetického rušení*

### Nízkofrekvenční rušení

Nízkofrekvenčním rušením je až na výjimky míněno zhoršení kvality síťového napájení rušením šířícím se po napájecím vedení veřejných rozvodných sítí. Kvalita napájení el. energií z veřejné distribuční sítě je dána normou ČSN EN 50160.

Harmonická rušení jsou způsobované zařízeními s nelineární charakteristikou napětí/proud. Harmonické proudy jsou generované zejména zařízeními s fázovým řízením a s velkým výkonem nebo neřízenými usměrňovači, zvláště s kapacitním vyhlazováním. Hlavní škodlivé účinky harmonických jsou chybná činnost regulujících zařízení, systémů síťové signalizace, ochran, prostředků řízení, případné zvýšené ztráty v rotačních strojích atd.

Pohony vytvářejí v důsledku vstupního usměrňovače vyšší harmonické složky proudu. Harmonické je možno zredukovat za použití dalších tlumivek v jednosměrném meziobvodě měniče nebo výkonového vstupu. Meze pro proudy jednotlivých harmonických jsou dané normou ČSN EN 61000-3-2.[25]

### Vysokofrekvenční rušení

Ve srovnání s nízkofrekvenčním rušením nesouvisí vysokofrekvenční rušení zpravidla bezprostředně s kvalitou síťového napájení, a jeho účinek se proto projevuje především v informační části rušených systémů - v měřicích, řídicích, komunikačních obvodech apod.,

kde rušivý signál či šum může být superponován k užitečnému signálu nebo ho může i zcela potlačit.

Vysokofrekvenční rušení se odehrává v kmitočtovém pásmu od 9 kHz až do stovek GHz. Může se šířit jak po vodičích (napájecích i datových) - zde především v nižší části spektra (zpravidla se sleduje do cca 30 MHz), tak prostorem jako pole (zpravidla se sleduje od 30 MHz do současné obvyklé hranice 1 GHz). Zdroje vf rušení jsou dané normou ČSN IEC 1000-2-3.

Vysokofrekvenční kmity vznikají též periodickým buzením RLC kmitavých obvodů, v nichž často působí i parazitní indukčnosti a kapacity obvodu. Sem patří:

- komutátorové motory např. elektrického nářadí - ČSN EN 55014,
- zážehové systémy spalovacích motorů - ČSN CISPR 12,
- spínání polovodičových součástek v obvodech výkonových měničů.

Vzhledem k vysokým napětím a krátkým dobám nárůstu ( $du/dt$ ) používaným v moderních střídačích je nutné věnovat velkou pozornost zjištění, že instalace pohonu vyhovuje požadované normě. Vyzařování do napájení je možné ovlivnit vstupními filtry pohonu.

## **Impulsní rušení**

Je způsobeno spínacími procesy ve výkonových obvodech. Při impulsním rušení je rušivý signál tvořen impulsem (krátkodobá změna elektromagnetického rušivého signálu s následným rychlým návratem k výchozí hodnotě) nebo skupinou impulsů. Impuls je charakterizován amplitudou, dobou náběhu a dobou trvání.

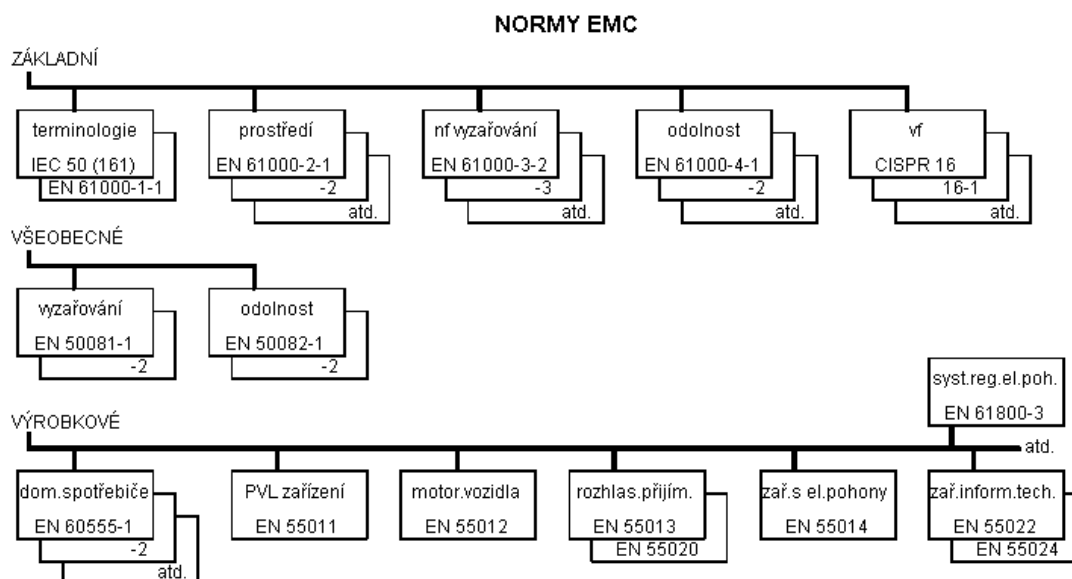
Impulsní rušení může vyvolat elektromagnetickou interferenci jak s informační částí rušeného objektu tak i s jeho výkonovou částí, pokud má rušivý signál dostatečnou energii - ČSN IEC 1000-2-3.[14]

### **2.4.2 Normalizace požadavků na EMC**

Pro umožnění volného pohybu zboží v rámci evropského trhu zemí Evropské unie (EU) i zemí přidružených je třeba zajistit:

- jednotná legislativní pravidla, vydávaná EU jako tzv. směrnice (Directives), přejímané jednotlivými státy formou zákonů,
- jednotná technická pravidla (normy), vydávaná evropskými normalizačními institucemi jako harmonizované evropské normy a přejímané jednotlivými státy formou státních norem.

Normy EMC jsou tříděny do tří základních skupin, viz obr.č.04.[14]



Obr.č.04: Přehled skupin norem EMC

### 3. Porovnání chování ASM napájeného ze sítě oproti napájení z měniče frekvence

Cílem této části je porovnat chování asynchronního motoru napájeného sinusovým napětím s frekvencí 50Hz oproti napájení nesinusovým napětím z měniče frekvence při skalárním a vektorovém řízení.

Asynchronní motor napájený sinusovým napětím má minimální nároky na údržbu, dobrou dynamiku a lze jej použít v širokém (celém) výkonovém rozsahu. Jednoduchá konstrukce zajišťuje vysokou provozní spolehlivost a přijatelnou pořizovací cenu. Problémem při spouštění tohoto motoru je velký záběrný proud, který při nulových otáčkách je roven proudu nakrátko a je několikanásobkem jmenovitého proudu ( $I_z = (3 \text{ až } 7)I_n$ ). Dalším problémem může být i velký záběrný moment, který může způsobit nežádoucí ráz v poháněné soustavě (textilní stroje, výtahy).[15] Z výše uvedených důvodů se asynchronní motor často rozbíhá se sníženým napětím. Toto lze realizovat spouštěcím transformátorem, spouštěcími odpory či tlumivkami, přepínačem hvězda/trojúhelník nebo polovodičovými měniči napětí (Soft-start). Jednou z nejvíce uváděnou nevýhodou je závislost otáček na frekvenci napájecího napětí. Otáčky jsou tak obtížně regulovatelné. Jejich změna [část 2.1.2] je provázena značnými problémy, jako jsou větší vznikající ztráty, oteplování motoru, malý rozsah regulace.

Regulovat otáčky změnou počtu pólových dvojic lze pouze skokově. Otáčky je možné měnit nejčastěji v poměru 1:2; 1:2:3 a 1:3. Různý počet pólových dvojic se provádí různým



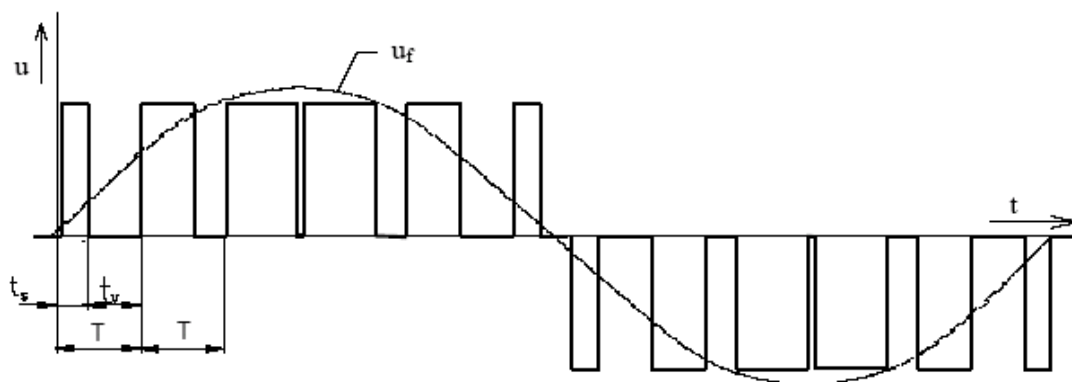
spojením větví statorového vinutí nebo přepínáním mezi více samostatnými vinutími, která jsou uložena společně v drážkách statoru nad sebou. Při tomto způsobu se zvětšují rozměry a zvyšují náklady motoru.[1]

Regulací otáček změnou skluzu lze dosáhnout plynulé změny rychlosti, přičemž skluz je možné při daném zátěžném momentu měnit změnou napětí statoru, rotorového odporu nebo tzv. kaskádním spojením. Změna rotorového odporu se provádí pouze u kroužkových motorů, kdy se skluz mění zařazením odporu do rotoru motoru. Jde samozřejmě o regulaci ztrátovou.

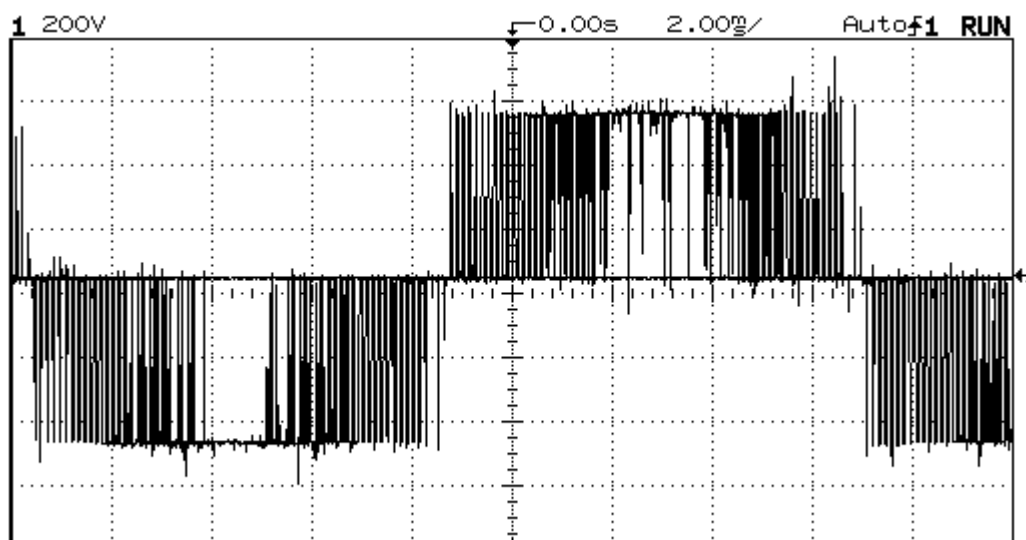
Regulací velikostí napájecího napětí je možné měnit velikost momentu, a tak měnit velikost ustálené rychlosti pohonu. Pro velmi strmě klesající zátěžný moment s otáčkami, lze řízením napětí tyto otáčky řídit pouze ve velmi úzkém rozsahu. Změna velikosti napájecího napětí se provádí pomocí regulačního autotransformátoru. Přes uvedené nevýhody se v některých výkonově nenáročných aplikacích tento princip používá, protože vlastní regulace rychlosti je jednoduchá a spolehlivá.[1]

Moderní technologie výkonových spínačů umožnila vstup této techniky i do oblasti řízení otáček asynchronních motorů pomocí frekvenčních měničů a odstranila tak jejich zmíněnou největší nevýhodu.[9]

Asynchronní motor napájený výstupním nesinusovým napětím z měniče frekvence lze regulovat plynule.[část 2.3.1] Příklady tohoto napájení zobrazují obr.č.05 a obr.č.06.



*Obr.č.05: Princip pulsně-šířkové modulace výstupního napětí měniče*



*Obr.č.06: Reálný průběh sdruženého napětí v jedné fázi ASM napájeného měničem Siemens Micromaster 420*

Toto napájení je však provázáno snížením výkonu, životnosti a účinnosti motoru. Vznikají napěťová přepětí, zvětšuje se oteplení motoru, dochází ke zvýšenému namáhání mechanických částí a zvýšení hlučnosti motoru.

Snížení výkonu je způsobené měničem frekvence, který pro svůj provoz spotřebovává část příkonu do motoru.

Poruchy, které jsou vyvolány měniči kmitočtu, lze rozdělit na nízkofrekvenční zpětné působení na síť (vyšší harmonické) a vysokofrekvenční poruchy (poruchy v šíření rádiových vln). Jsou definovány v rozsahu 150kHz až 30MHz (šíří se vedením) a v rozsahu 30MHz až 1GHz.[10].

Napěťová přepětí vznikají vlivem spínacích polovodičových prvků frekvenčního měniče. Má-li se průběh výstupního napětí měniče co nejvíce přibližovat sinusovému, je třeba volit spínací polovodičové prvky se spínací frekvencí nad 16kHz (tj. v oblasti ultrazvuku). Při takové spínací frekvenci ale vzniká gradient napětí  $du/dt$  až  $100\text{kV}/\mu\text{s}$  a na svorkách motoru se mohou vyskytovat vrcholové hodnoty napětí přes 1000V. Při frekvenci 50Hz je spínací doba 5ms a gradient napětí  $0,2\text{kV}/\mu\text{s}$ . Při velkých hodnotách  $du/dt$  mohou vznikat dílčí výboje a závitové zkraty ve vinutí motoru.[16] Amplituda přepěťových špiček přitom závisí nejen na parametrech  $du/dt$  a  $di/dt$ , ale i na délce kabelu mezi výstupem měniče a motorem. Vzniká tak velmi nebezpečná situace, která překračuje rámec EMC a stává se problémem ekonomicko–technologickým. Přepěťové špičky, jejichž úroveň může dosahovat řádově kV, jsou superponovány na napájecí napětí motoru a trvale namáhají izolaci jak napájecího kabelu, tak i motoru. Vzhledem k tomu, že s tímto jevem není většinou počítáno ve fázi konstrukce a projekce, zejména při rekonstrukci zastaralých provozů, výsledkem jsou jak

havárie způsobené přehřátím a průrazy izolace, tak i velmi rychlé stárnutí izolace kabelu i motoru. Připočteme-li k tomu ještě anténní efekt kabelu, vyzařujícího do svého okolí elektromagnetické pole intenzity, mnohonásobně převyšující úroveň odolnosti proti rušení ostatních aplikací sdílejících společný elektromagnetický prostor, je zřejmé, že se jedná o velmi vážnou situaci EMC. To, že přepět'ové špičky velikosti řádově kV a s opakovacím kmitočtem řádově jednotky a desítky kHz, výrazným způsobem zkracují životnost izolace, a tím i životnost celého motoru. Tento fakt nutí výrobce vyrábět stroje s izolací projektovanou na zvýšené napět'ové namáhání izolace. Přitom někteří výrobci prohlašují, že takové motory lze připojit k měniči pomocí dlouhého kabelu bez jakýchkoli „opravných“ prostředků, tj. filtrů a tlumivek. Novými motory výrobci sice zajistí EMC „svého“ systému měnič – motor, ale nepotlačené přepět'ové špičky se budou šířit ve formě vf rušivého elektromagnetického pole, vyzařovaného kabelem v prostoru kolem soustavy měnič – kabel – motor, a prostřednictvím jiné „cizí“ kabeláže rozšíří rušivou emisi po celém objektu, včetně napájecích sítí. Problém EMC bude existovat dál a bude vyžadovat řešení od investora, případně uživatele těchto systémů.[9]

Při napájení nesinusovými proudy s velkým množstvím vyšších harmonických složek vznikají v asynchronním motoru velké přechodové momenty, které mohou i několikrát převyšovat jmenovité momenty. Tyto momenty způsobují zvýšené namáhání mechanických částí, zejména ložisek. Způsobují hlučný chod a mohou být zdrojem závažné poruchy. Kolísání otáček a momentu může způsobit rezonanci celé poháněné soustavy, při které může dojít i k havárii.[16]

Rychlejší stárnutí izolace motoru je také důsledek nevratných fyzikálně chemických procesů, probíhajících vlivem pole vyšších harmonických a vlivem přídavného ohřevu. Při nesinusovém napětí se rovněž vyskytují častější poruchy v kabelových sítích. Jednofázové zkraty a zemní spojení vznikají častěji, než při čistě sinusovém napětí.[17]

## 4. Experimentální část

Cílem experimentální části je:

- zpracovat průběhy vstupních i výstupních napětí/proudů naměřených při jmenovitém a sníženém zatížení motoru, různých frekvencích přiváděného napětí a modulačních frekvencích,
- provést harmonickou analýzu zpracovávaných průběhů, ukázat vliv a velikost vznikajícího harmonického rušení,
- zjistit vliv vstupního a výstupního filtru na velikost vznikajícího rušení.

V této části je také uvedeno zapojení měřicí soustavy, postup měření průběhů elektrických veličin, harmonická analýza naměřených dat a je diskutován vliv zapojení silového obvodu na účinnost asynchronního motoru.

### 4.1 Popis měřicího pracoviště

Měření bylo prováděno na měřícím pracovišti v laboratoři katedry elektrotechniky EL2. Pracoviště označené „Simover/Simoreg“ je osazeno dvěma motory na společné hřídeli. Jeden motor je asynchronní (1,5kW, 925ot/min) a je řízen frekvenčním měničem SIMOVERT. Druhý motor je stejnosměrný s cizím buzením (1,74kW, 1040ot/min) a je řízen měničem SIMOREG typ 6RA 70. Motor je vybaven inkrementálním snímačem otáček POG 9D 1024. Oba regulované pohony jsou vybaveny proudovou a otáčkovou zpětnou vazbou.

Nedílnou částí pracoviště je softwarové vybavení měničů a řídicí počítač. Nastavování parametrů pohonu a vizualizaci chodu pohonu, je možné provádět pomocí softwaru SIMOVIS verze 5.4, který je nainstalován na řídicím počítači. Řídicí a regulační funkce jednotlivých měničů jsou určeny softwarovým vybavením uloženým v paměti řídicí jednotky měniče. Softwarové vybavení měniče se skládá z funkčních bloků, které jsou autonomní s jasně

definovanými vstupy, výstupy a funkcemi. Uživatel může nejen nastavovat parametry jednotlivých bloků, ale tyto bloky mezi sebou libovolně propojovat a tím vytvářet i složité regulační struktury. Pro programování měničů se používá programovací technika BICO, která umožňuje vytvořit regulační strukturu pohonu, podle požadavku na vlastnosti navrhovaného pohonu.[18]

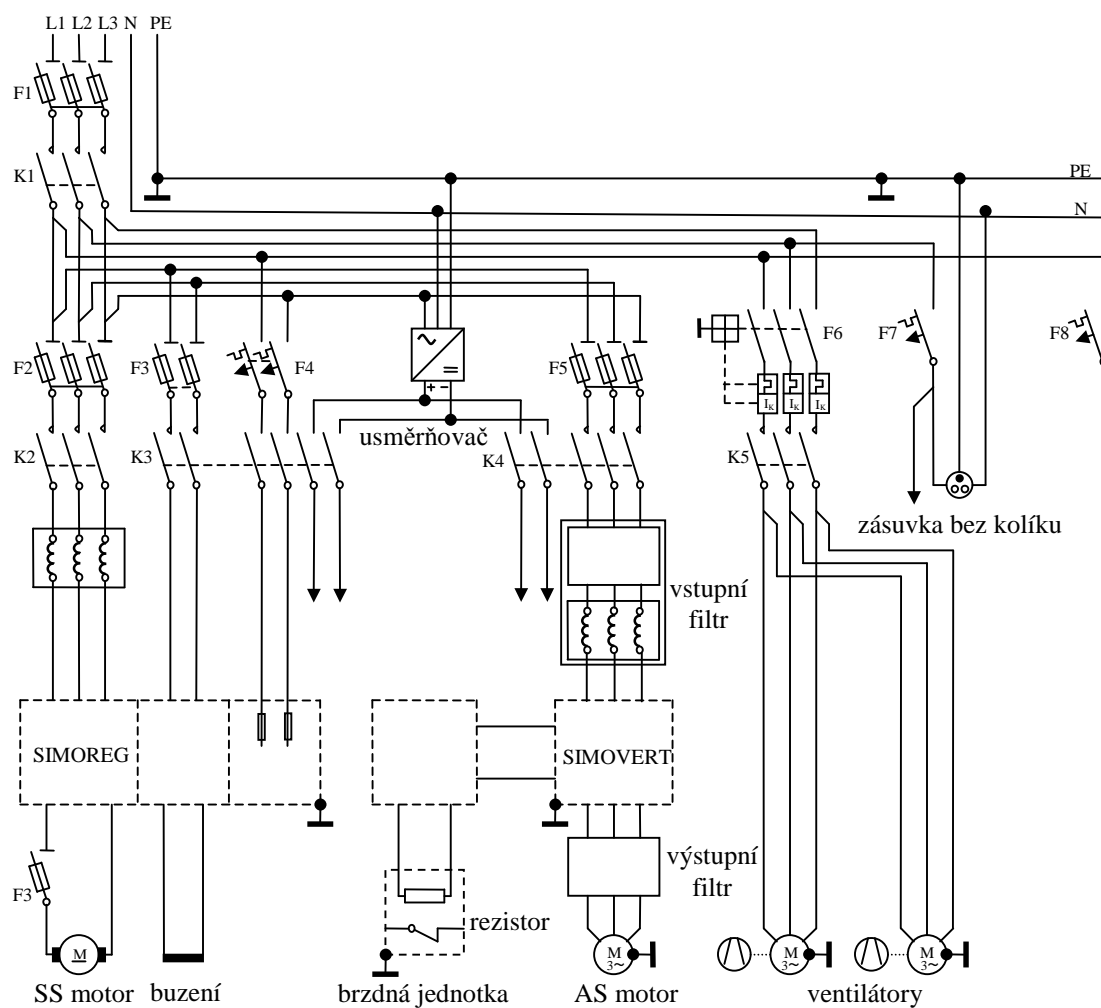


*Obr.č.07: Měřícího pracoviště „Simovert/Simoreg“*



Obr.č.08: SSM a ASM na společné hřídeli

#### 4.1.1 Schéma zapojení měřicího pracoviště



*Obr.č.09: Elektrotechnické schéma zapojení pracoviště „Simovert/Simoreg“*

Obr.č.09 zobrazuje elektrotechnické zapojení měřicího pracoviště, kde je  $F1-F3, F5$  - zkratová ochrana,  $F4, F7, F8$  - tepelná ochrana,  $F6$  - nastavitelný propustný proud,  $K1-K5$  – stykač. Celé pracoviště je napájeno z 3-fázové elektrické sítě přes zkratovou ochranu a centrální vypínač. Jednotlivá zařízení mají samostatné napájení a lze je ovládat přes centrální ovládací panel – obr.č.07.

#### 4.1.2 Měřená zařízení

Veškerá měřená zařízení byla vyrobena firmou SIEMENS.

**Asynchronní motor -**

typ: 1LA5106–6AA10–Z

krytí: IP55

chlazení: externí

jmenovité napětí  $U_n = 230V/400V \Delta/Y$

jmenovitý proud  $I_n = 6,7A/3,85A \Delta/Y$

jmenovitá frekvence  $f_n = 50Hz$

jmenovitý výkon  $P_n = 1,5kW$

jmenovité otáčky  $n_n = 925ot/min$

jmenovitá účinnost  $\eta = 0,72$

jmenovitý moment setrvačnosti  $J = 0,0083kgm^2$

$\Delta$ :  $U = 220-240V$ ;  $I = 6,8-6,6A$

$Y$ :  $U = 300-420V$ ;  $I = 3,9-3,8A$

maximální hodnoty:

$f = 60Hz$ ;  $P = 1,75kW$ ;  $\cos\varphi = 0,78$

**Stejnoseměrný motor -**

typ: 1GL5104–OEB20–6VV1–Z

chlazení: externí

jmenovité napětí  $U_n = 420V$

jmenovitý proud  $I_n = 5,9A$

jmenovitý výkon  $P_n = 1,72kW$

jmenovité otáčky  $n_n = 1200ot/min$

rozmezí  $U = 110-420V$ ;  $I = 5,80-5,90A$ ;

minimální/maximální hodnoty:

$n = 10-1040ot/min$ ;  $P = 0,0165-1,72kW$

**Frekvenční měnič Simovert** -typ: 6SE7016–1EA20

	vstup: $U = 380\text{--}460\text{V}$ ; $I = 6,1\text{A}$ ; $f = 50/60\text{Hz}$
	výstup: $0\text{--}U_n$ ; $I = 6,1\text{A}$ ; $f = 0\text{--}600\text{Hz}$
<b>Měnič Simoreg -</b>	typ: 6RA2413–6DV62–0
	vstup: $U = 400\text{V}$ ; $I = 12,5\text{A}$ ; $f = 50/60\text{Hz}$
	výstup: $U = 420\text{V}$ ; $I = 15\text{A}$
<b>Vstupní filtr -</b>	typ: 6SE7021–0ES87–0FB1
	$U = 380\text{--}480\text{V}$ ; $I = 12\text{A}$ ; $f = 50\text{--}60\text{Hz}$
<b>Tlumivka -</b>	typ: 4EP3701-3US
	$U = 460\text{V}$ ; $I = 6,1\text{A}$ ; $L = 3465\mu\text{H}$
<b>Výstupní sinusový filtr -</b>	typ: 6SE7016–0EP87–0FB0
	$U = 380\text{--}480\text{V}$ ; $I = 6\text{A}$ ; $f = 50\text{--}60\text{Hz}$

## 4.2 Měření asynchronního motoru napájeného z měniče frekvence

Úkolem bylo podle normy ČSN EN 61000-4-7 „Všeobecný pokyn o měření a měřících přístrojích harmonických a meziharmonických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich“ [19] změřit při různých:

- modulačních frekvencích měniče - 2,5; 8; 16kHz
- frekvencích přiváděného napětí - 15; 35; 50Hz
- zatíženích - 10; 15Nm

obsah harmonických:

- ve vstupním a výstupním napětí/proudu měniče,
- ve vstupním a výstupním napětí/proudu měniče s předřazeným vstupním pasivním LC filtrem,
- ve vstupním a výstupním napětí/proudu měniče s výstupním pasivním sinusovým filtrem za měničem,
- ve vstupním a výstupním napětí/proudu měniče s předřazeným vstupním pasivním LC filtrem a s výstupním pasivním sinusovým filtrem za měničem,
- ve výstupním napětí/proudu za měničem a před asynchronním motorem při použití dlouhého napájecího kabelu.

Měření bylo prováděno pomocí laboratorního PC, přístroje EMU 2 a proudových klešťových sond LEM PR200. Před samotným měřením byla provedena počítačově řízená kalibrace proudových sond. EMU 2 bylo zapojeno do silového obvodu asynchronního motoru, napájeného frekvenčním měničem SIMOVERT. Ten byl zatěžován stejnosměrným motorem s cizím buzením, napájený měničem SIMOREG. Požadovaný zatěžující moment

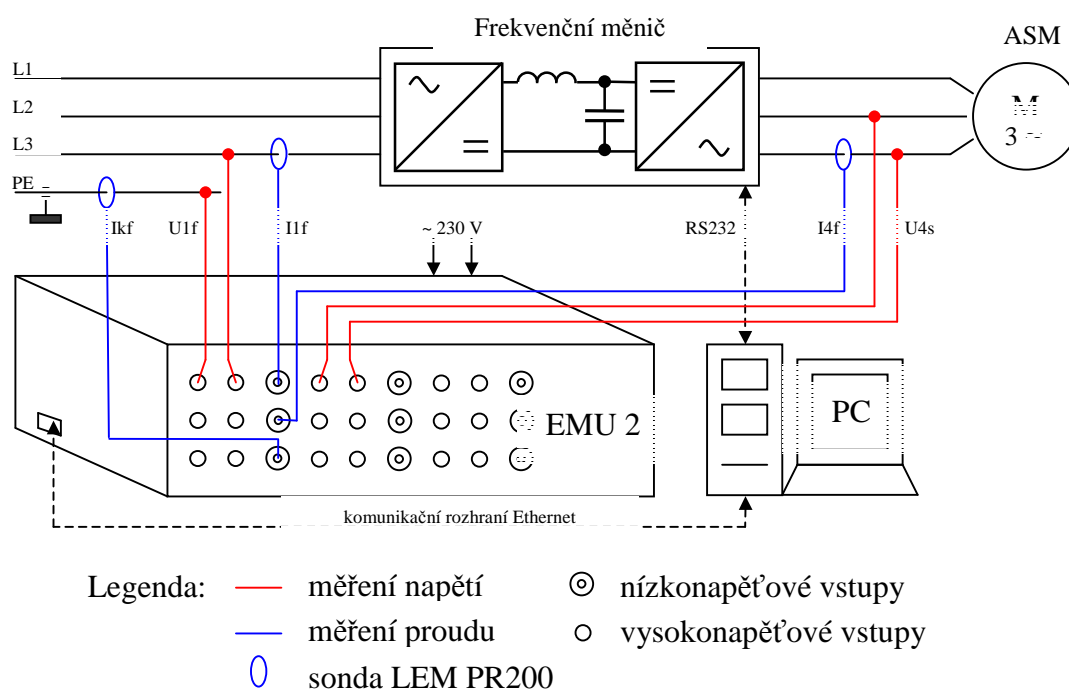


stejnoseměrného motoru byl nastavován pomocí ovládacího panelu měniče SIMOREG. Parametrem  $P\ 051$  byla povolena přístupová práva ke změně nastavení, parametrem  $P\ 084$  byl přepnutím do pozice 2 odpojen regulátor otáček a to způsobilo, že motor mohl pracovat jako libovolná zátěž. Parametrem  $P\ 021$  byla podle vztahu  $M=P\ 021/5,5$  z [20] nastavena hodnota žádaného momentu (10Nm; 15Nm). Frekvenční měnič SIMOVERT byl nastaven na skalární řízení a ovládán přes laboratorní PC softwarem SIMOVIS 5.4. Parametrem  $P\ 684$  byla měněna rychlost komunikace (38400 b/s), parametrem  $P\ 092$  nastavení výstupního filtru (sinusový) a parametrem  $P\ 761$  velikost modulační frekvence (2,5; 8; a 16kHz).

#### 4.2.1 Měřicí zařízení Ethernet Multifunction Unit EMU2 a sonda LEM PR 200

Pro měření byl použit měřicí přístroj EMU2, který byl vyroben na katedře elektrotechniky a elektromechanických systémů v rámci disertační práce a je zobrazen ve schématu zapojení při měření elektrických veličin ASM napájeného z frekvenčního měniče - obr.č.10. Měřicí přístroj obsahuje 9 analogových kanálů pro vysokonapěťové vstupy (do 750V) a 9 analogových kanálů pro nízkonapěťové vstupy (150mV, 1,5V, 15V). Přístroj je opatřen datovým výstupem, který umožňuje přenos dat pomocí komunikačního rozhraní Ethernet do osobního počítače.

Pro měření fázových proudů byly použity lehce přenosné měřicí proudové klešťové sondy LEM PR 200 s rozsahy 20A, 10mV/A nebo 200A, 1mV/A.



Obr.č.10: Schéma zapojení EMU 2 do silového obvodu motoru

Ve schématu je  $U_{1f}$  - fázové napětí,  $U_{4s}$  - sdružené napětí,  $I_{1f}$  a  $I_{4f}$  - fázové proudy,  $I_k$  - kontrolní proud vodiče PE

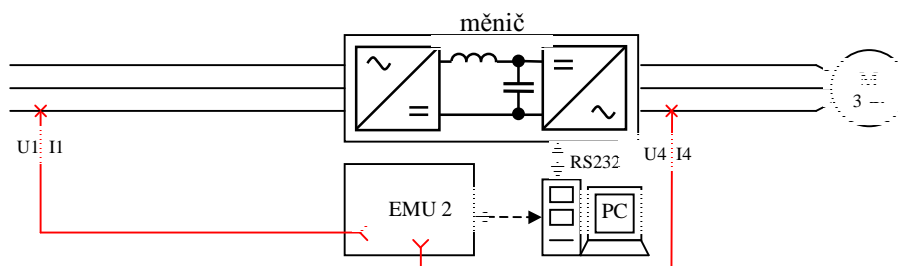
Měřicí frekvence  $f_v$  EMU 2 je 12,8kS/s. Podle „Shanonova teorému“ je třeba vzorkovat (měřit) s 2x rychlejší frekvencí než je maximální frekvence  $f_{max}$  obsažená v měřeném signálu. Aby byla splněna podmínka  $f_v = 2 \times f_{max}$  je v EMU 2 zabudovaný „antialiasing“ filtr, který ještě před převedením signálu vyšší frekvence odstraňuje. Při měření byla nastavována modulační frekvence 2,5; 8 a 16kHz. Naměřená data po zpracování EMU 2 už neobsahují veškeré frekvence obsažené v původním signálu.

#### 4.2.2 Měření bez vstupního a výstupního filtru

Při měření byly pomocí EMU 2 snímány:

- síťové vstupní fázové napětí  $U_{1f}$  třetí fáze L3 proti zemnímu vodiči PE a výstupní sdružené napětí  $U_{4s}$  mezi fází L3 a L2.
- síťový vstupní fázový proud  $I_{1f}$  a výstupní fázový proud  $I_{4f}$  třetí fáze L3 pomocí klešťové sondy LEM PR200.
- kontrolní proud  $I_k$  zemního vodiče pomocí klešťové sondy LEM PR200.

Proti běžícímu SSM, který fungoval jako zátěž, se uvedl do chodu měřený ASM. Různé modulační frekvence měniče byly nastavovány softwarem SIMOVIS. Frekvence přiváděného napětí do motoru byla nastavována potenciometrem na řídicím panelu měřicího pracoviště a zatížení pomocí měniče SIMOREG.



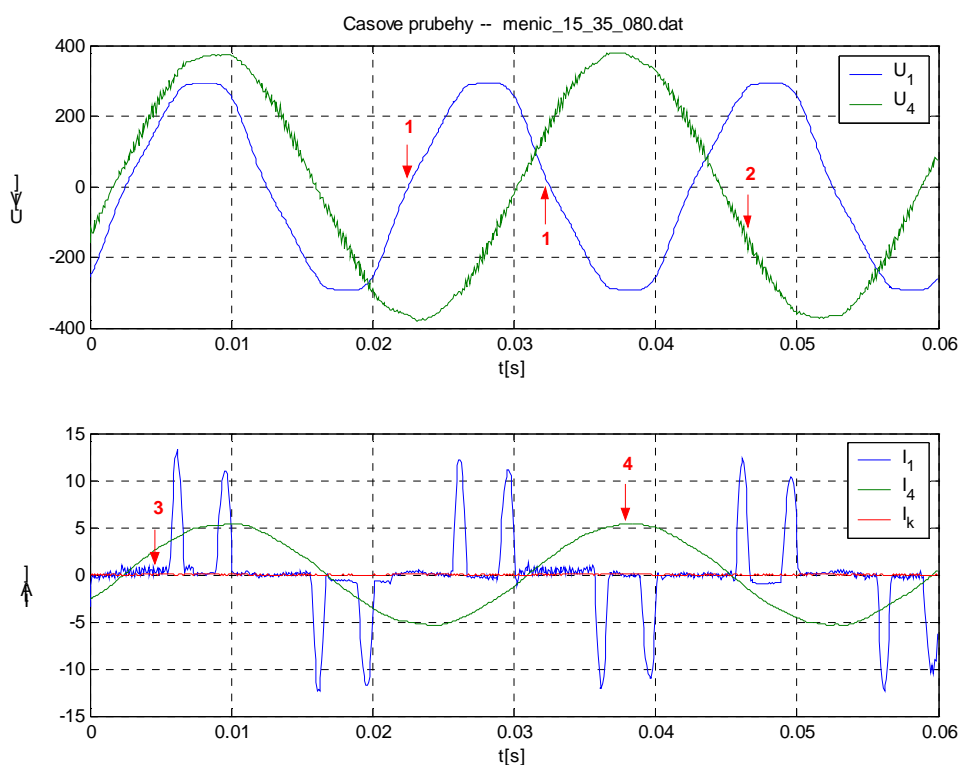
Obr.č.11: Zapojení bez vstupního a výstupního filtru

Měřená data byla síťovým propojením z EMU 2 snímána do laboratorního PC. Příklad naměřených dat, zpracovávaných pomocí softwaru MATLAB 6.5 ukazuje graf č.01, kde  $U_1/I_1$  je vstupní napětí/proud ze sítě,  $U_4/I_4$  je výstupní napětí/proud z měniče do motoru,  $I_k$  je kontrolní proud zemního vodiče PE. Velikost proudu na zemním vodiči PE je fázorový součet všech 3 fázových proudů. Pokud je  $I_k = 0$ , jedná se o souměrnou zátěž.

V grafu je pod *pozicí č.1* vidět deformovaný průběh vstupního napětí, který může být způsobený působením zářivkových těles a počítačů na měkkou síť budovy. *Pozice č.2*

zobrazuje rozkmitaný průběh výstupního napětí, které je způsobené zvolenou frekvencí napájecího napětí a velikostí modulační frekvence měniče. *Pozice č.3* naznačuje vstupní proud obsahující vyšší harmonické, kterými tak měnič rušivě působí na napájecí síť. *Pozice č.4* ukazuje na téměř sinusový průběh výstupního proudu, čímž lze předpokládat malý obsah vyšších harmonických výstupního proudu.

Je zřetelné, že průběh proudu nemá sinusový tvar, ale tvoří jej dva impulsy v každé půlperiodě napětí. Proudové impulsy jsou charakteristické pro usměrňovač. Průběh těchto proudových impulsů lze matematicky popsat rozčleněním na násobky základního kmitočtu (harmonické). V elektrorozvodné síti nepříznivě působí především vyšší harmonické, které na impedanci sítě způsobují zkreslení průběhu napětí..



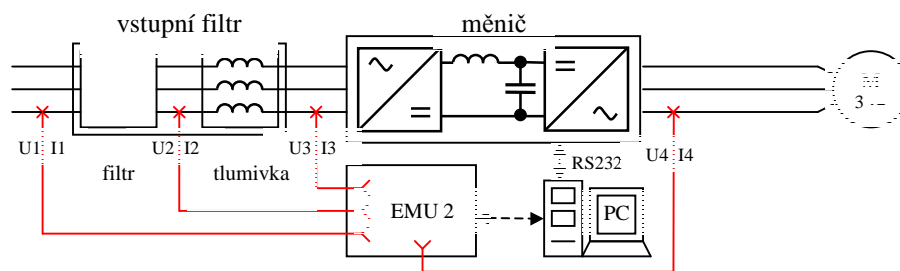
*Graf č.01: Průběhy vstupních a výstupních napětí/proudů*

### 4.2.3 Měření se vstupním filtrem

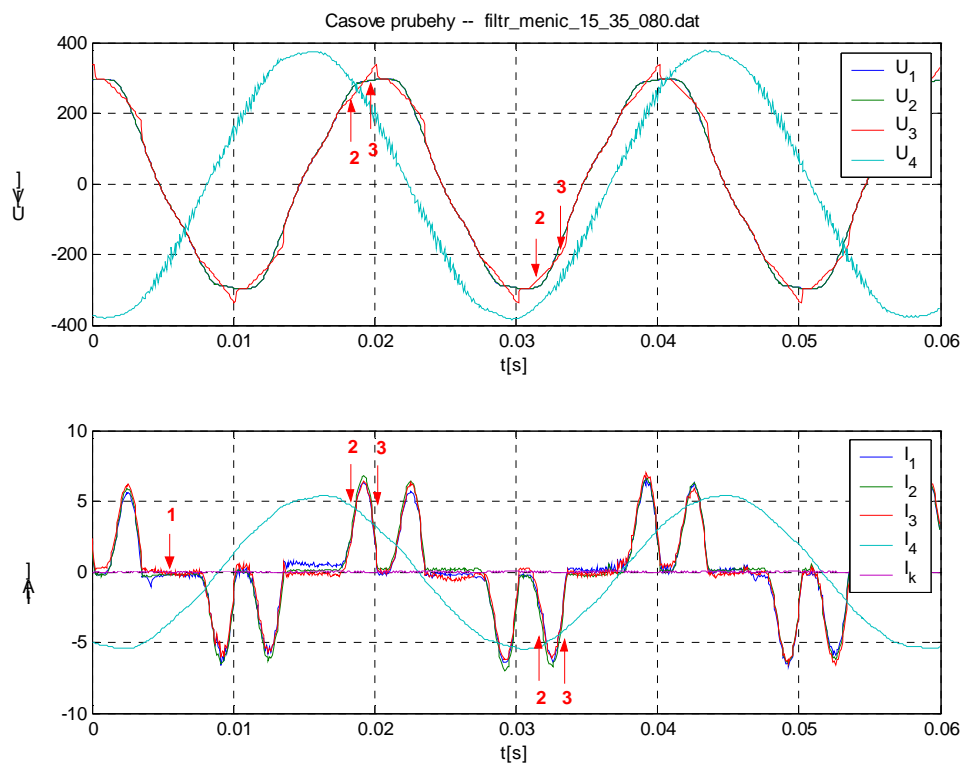
Při měření byly pomocí EMU 2 snímány:

- síťové vstupní fázové napětí  $U_{1f}$ , fázové napětí  $U_{2f}$  mezi filtrem a tlumivkou, vstupní fázové napětí  $U_{3f}$  do měniče fáze L3 proti zemnicímu vodiči PE a výstupní sdružené napětí  $U_{4s}$  mezi fází L3 a L2.

- síťový vstupní fázový proud  $I_{1f}$ , fázový proud  $I_{2f}$  mezi filtrem a tlumivkou, vstupní fázový proud  $I_{3f}$  do měniče a výstupní fázový proud  $I_{4f}$  třetí fáze L3 pomocí klešťové sondy LEM 200.
  - kontrolní proud  $I_k$  zemnicího vodiče pomocí klešťové sondy LEM 200.
- Způsob měření byl prováděn jako v části 4.2.2.



Obr.č.12: Zapojení se vstupním filtrem s tlumivkou

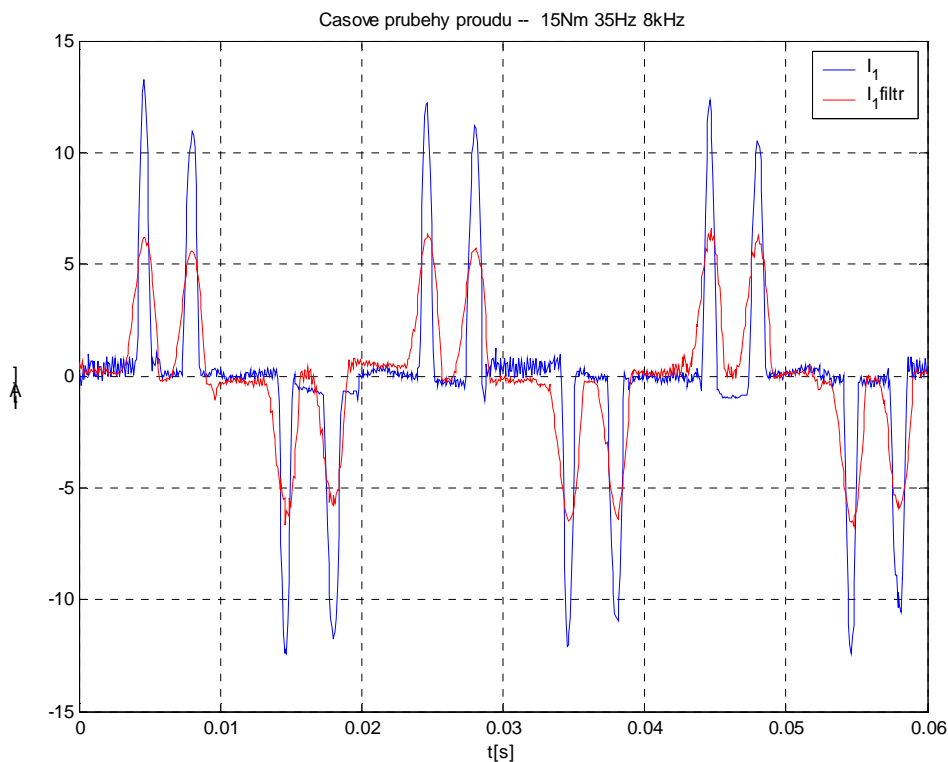


Graf č.02: Průběhy vstupních a výstupních napětí/proudů

Příklad naměřených dat ukazuje graf č.02, který zobrazuje průběhy napětí/proudů, kde  $U_{1-3}/I_{1-3}$  jsou vstupní napětí/proudy ze sítě,  $U_4/I_4$  je výstupní napětí/proud z měniče do motoru,  $I_k$  je kontrolní proud zemního vodiče PE.

V grafu jsou pod *pozicí č.1* vidět vstupní proudy rušené měničem, který rušivě působí na napájecí síť, i přes zapojený filtr s tlumivkou. *Pozice č.2* zobrazuje proudový impuls, který vlivem indukčnosti zapojené tlumivky způsobuje propad vstupního napětí  $U_3$  za tlumivkou. *Pozice č.3* ukazuje konec proudového impulsu, který způsobuje vzestup vstupního napětí  $U_3$  za tlumivkou.

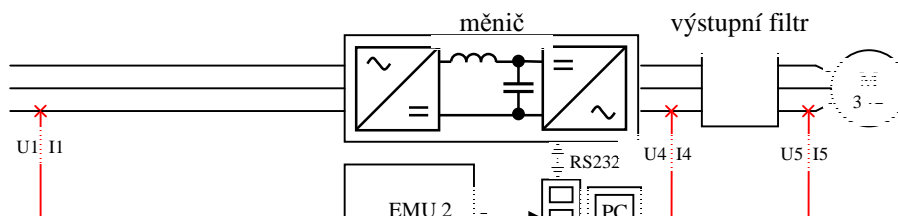
Z grafu je patrné, že vlivem vstupního filtru došlo ke snížení velikosti proudových impulsů až na polovinu původní hodnoty. Průběh je méně rušený, proudové impulsy jsou nižší a širší (mají širší patu). Signály nesou stejnou energii, plocha pod křivkami musí být stejná. Rozdíl ukazuje následující graf č.03.



Graf č.03: Porovnání průběhů vstupních proudů bez použití filtru a s filtrem

#### 4.2.4 Měření s výstupním sinusovým filtrem

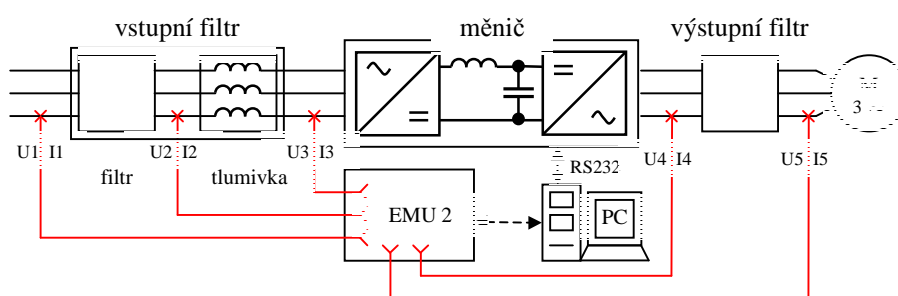
Při měření se ASM nepodařilo uvést do chodu. Měnič SIMOVERT zobrazoval chybové hlášení *F 038*, týkající se připojení výstupního filtru a *F 011* o vznikajícím nadproudu v zapojení. Při tomto měření se nepodařilo zaznamenat data, která by šla dále zpracovat.



Obr.č.13: Zapojení s výstupním filtrem

#### 4.2.5 Měření se vstupním filtrem a s výstupním filtrem

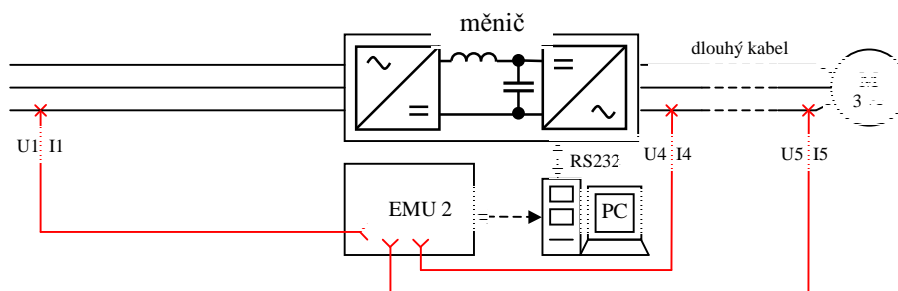
Při tomto měření došlo ke stejné závadě jako v části 4.2.4.



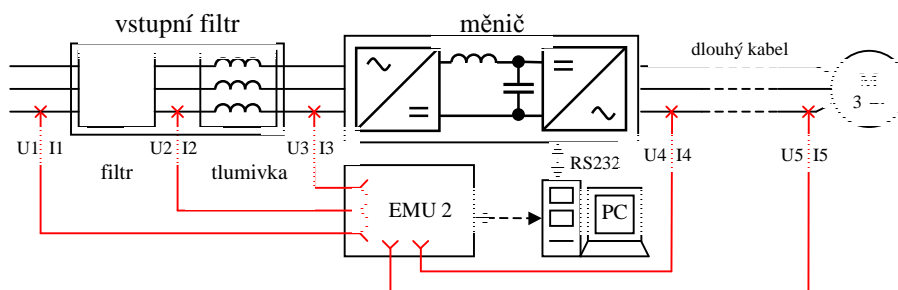
Obr.č.14: Zapojení se vstupním filtrem, tlumivkou a výstupním filtrem

#### 4.2.6 Měření při propojení frekvenčního měniče a ASM dlouhým napájecím kabelem

Způsob měření byl prováděn stejně jako v části 4.2.2. a 4.2.3.. 1,7m dlouhý napájecí kabel mezi frekvenčním měničem a ASM, byl nahrazen jiným 10,3m dlouhým napájecím kabelem. Oba napájecí kabely byly nestíněné, typu 3+1 – 3 měděné vodiče + 1 ochranný měděný vodič.



Obr.č.15: Zapojení s dlouhým kabelem



*Obr.č.16: Zapojení se vstupním filtrem, tlumivkou a dlouhým kabelem*

Naměřená data po zpracování ukázala, že měření z části 4.2.2., 4.2.3. a 4.2.6. jsou stejná a není mezi nimi žádný rozdíl. Měřený dlouhý kabel nemá při této délce žádný vliv na velikost vedeného napájení a případného nf rušení. Rozdíl v rušení nebylo možné tímto způsobem zapojení zjistit.

*Tab.č.01: Přehled naměřených souborů dat z části 4.2.2*

soubor číslo	zátěž [Nm]	frekvence [Hz]	modulační frekvence [kHz]	název souboru ve skriptech softwaru Matlab 6.5
1	10	20	2,5	menic_10_20_025.dat
2	10	20	8	menic_10_20_080.dat
3	10	20	16	menic_10_20_160.dat
4	10	35	2,5	menic_10_35_025.dat
5	10	35	8	menic_10_35_080.dat
6	10	35	16	menic_10_35_160.dat
7	10	50	2,5	menic_10_50_025.dat
8	10	50	8	menic_10_50_080.dat
9	10	50	16	menic_10_50_160.dat
10	15	20	2,5	menic_15_20_025.dat
11	15	20	8	menic_15_20_080.dat
12	15	20	16	menic_15_20_160.dat
13	15	35	2,5	menic_15_35_025.dat
14	15	35	8	menic_15_35_080.dat
15	15	35	16	menic_15_35_160.dat
16	15	50	2,5	menic_15_50_025.dat
17	15	50	8	menic_15_50_080.dat
18	15	50	16	menic_15_50_160.dat

○ *Přehled naměřených souborů dat z části 4.2.3*

soubor číslo	vstupní filtr	zátěž [Nm]	frekvence [Hz]	modulační frekvence [kHz]	název souboru ve skriptech softwaru Matlab 6.5
19	ano	10	20	2,5	filtr_menic_10_20_025.dat
20	ano	10	20	8	filtr_menic_10_20_080.dat
21	ano	10	20	16	filtr_menic_10_20_160.dat
22	ano	10	35	2,5	filtr_menic_10_35_025.dat
23	ano	10	35	8	filtr_menic_10_35_080.dat
24	ano	10	35	16	filtr_menic_10_35_160.dat
25	ano	10	50	2,5	filtr_menic_10_50_025.dat
26	ano	10	50	8	filtr_menic_10_50_080.dat
27	ano	10	50	16	filtr_menic_10_50_160.dat
28	ano	15	20	2,5	filtr_menic_15_20_025.dat
29	ano	15	20	8	filtr_menic_15_20_080.dat
30	ano	15	20	16	filtr_menic_15_20_160.dat
31	ano	15	35	2,5	filtr_menic_15_35_025.dat
32	ano	15	35	8	filtr_menic_15_35_080.dat
33	ano	15	35	16	filtr_menic_15_35_160.dat

34	ano	15	50	2,5	filtr_menic_15_50_025.dat
35	ano	15	50	8	filtr_menic_15_50_080.dat
36	ano	15	50	16	filtr_menic_15_50_160.dat

## 4.2.7 Harmonická analýza

Aby bylo možné ukázat vliv a velikost vznikajícího harmonického rušení produkované frekvenčním měničem, bylo nutno provést harmonickou analýzu naměřených průběhů napětí/proudů. Analýza byla prováděna následujícím postupem:

- upravení naměřených dat na celistvý počet period o 256 vzorcích,
- odstranění stejnosměrné složky z naměřených dat,
- provedení algoritmu rychlé Fourierovy transformace (FFT), jejímž výsledkem jsou hodnoty v komplexním tvaru,
- převedení komplexního tvaru na reálný, pomocí funkce absolutní hodnoty,
- odstranění druhé poloviny dat, protože po FFT jsou výsledná data symetrická a druhá polovina dat je zrcadlový obraz první poloviny dat,
- provedení přepočtu mezi efektivní hodnotou a amplitudou harmonického signálu,

(4.1)

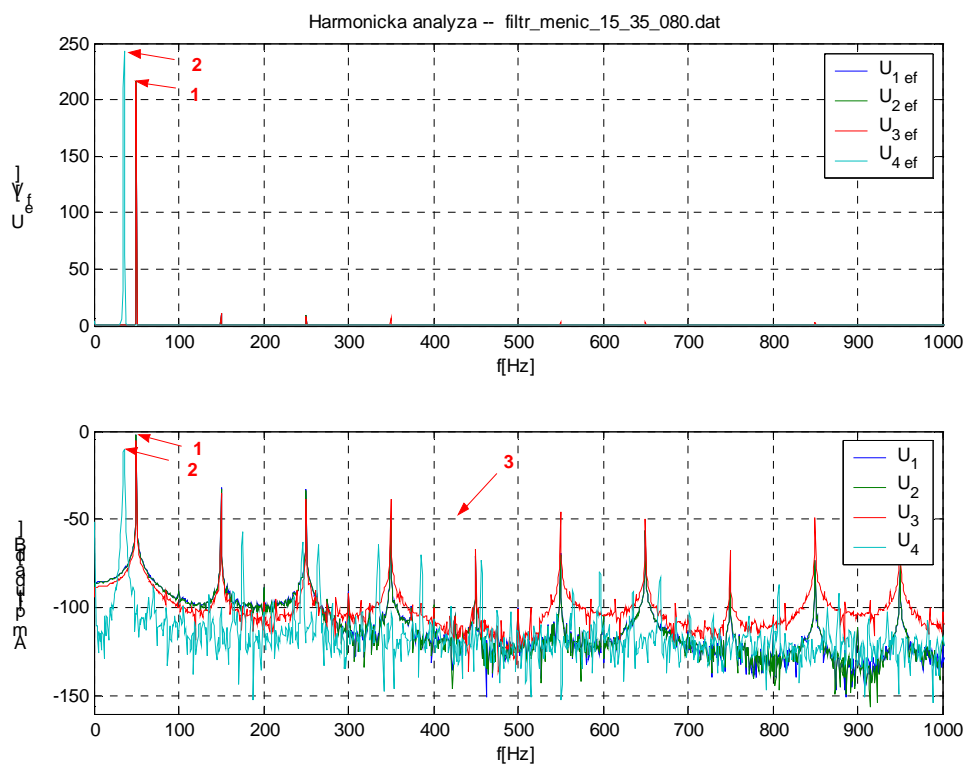
$$(4.2) \quad \begin{aligned} U_{ef} &= \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} \quad [V] \\ I_{ef} &= \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \quad [A] \end{aligned}$$

- převedení reálných hodnot na logaritmické pro lepší zviditelnění poměrného zastoupení jednotlivých harmonických složek,
- odečtení velikostí vyšších harmonických napětí a proudů.

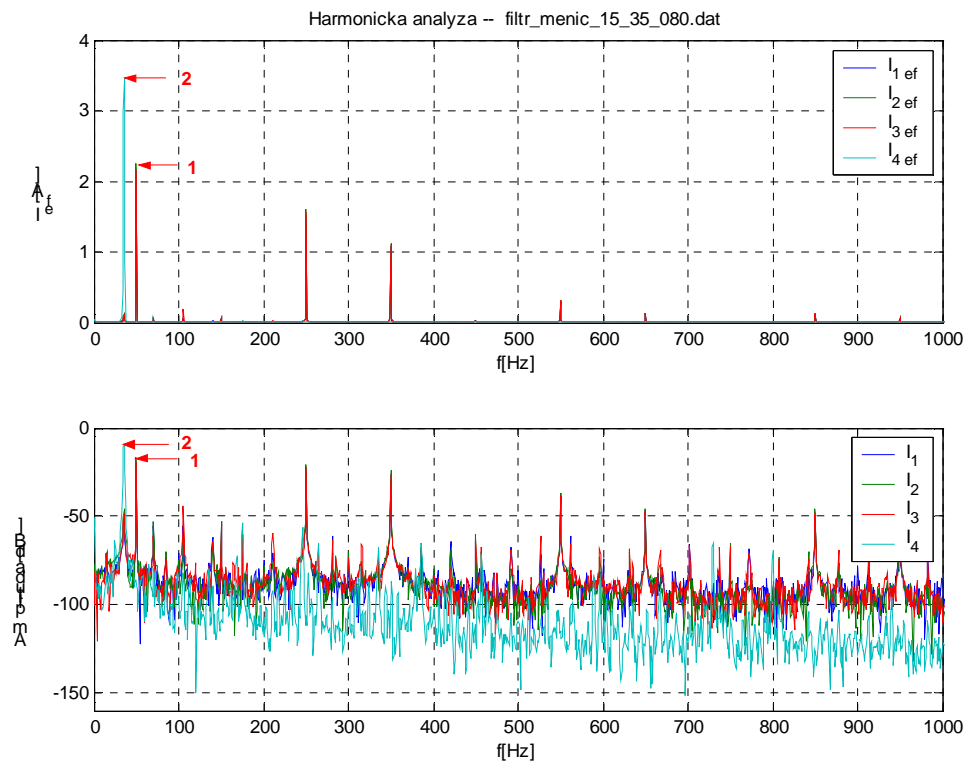
Protože u průběhů naměřených za měničem frekvence nejsme vlivem změny frekvence (20; 35; 50Hz) schopni přesně určit délku periody, bylo třeba před výpočtem FFT provést úpravu dat, pomocí metody „Hanning window“, která data upravila na celistvý počet period.[21],[22]

Příklad provedené frekvenční analýzy pomocí softwaru MATLAB 6.5 ukazují grafy č.04-06.





Graf č.04: Frekvenční analýza průběhů vstupních a výstupních napětí



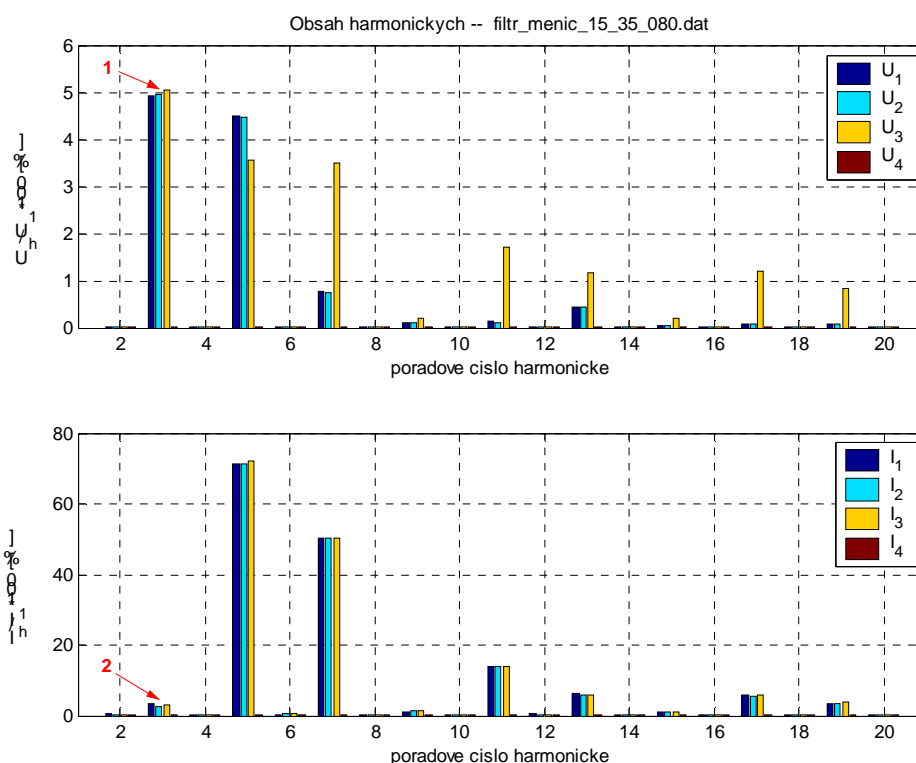
Graf č.05: Frekvenční analýza průběhů vstupních a výstupních proudů

Graf č.04 zobrazuje frekvenční analýzu průběhů napětí, kde  $U_{1-3}$  jsou vstupní napětí ze sítě,  $U_4$  je výstupní napětí z měniče do motoru. V druhé části grafu je analyzovaný průběh zlogaritmovaný pro zobrazení poměrového zastoupení jednotlivých harmonických složek.

V grafu jsou pod *pozicí č.1* vidět hodnoty prvních harmonických vstupních napětí, které mají prakticky stejnou hodnotu. *Pozice č.2* zobrazuje hodnotu první harmonické výstupního napětí. *Pozice č.3* ukazuje poměrné zastoupení jednotlivých harmonických složek. Rozdíl 10dB je roven rozdílu jedné dekády (jednoho řádu).

Graf č.05 zobrazuje frekvenční analýzu průběhů proudů, kde  $I_{1-3}$  jsou vstupní proudy ze sítě,  $I_4$  je výstupní proud z měniče do motoru.

V grafu jsou pod *pozicí č.1* vidět hodnoty prvních harmonických vstupních proudů, které mají prakticky stejnou hodnotu. *Pozice č.2* zobrazuje hodnotu první harmonické výstupního proudu. Vyšší harmonické jsou celistvé násobky základní harmonické, jejich obsah pro toto měření ukazuje graf č.06.



Graf č.06: Obsah vyšších harmonických napětí/proudů

Graf č.06 naznačuje obsah vyšších harmonických napětí/proudů, kde  $U_{1-3}$  jsou velikosti harmonických vstupních napětí,  $U_4$  je velikost harmonických výstupního napětí,  $I_{1-3}$  představuje velikosti harmonických vstupních proudů a  $I_4$  je velikost harmonických

výstupního proudu. Hodnoty jsou uváděny v procentuelním poměru k velikosti první harmonické.

V grafu jsou pod *pozicí č.1* vidět velikosti třetích napěťových harmonických. *Pozice č.2* zobrazuje velikosti třetích proudových harmonických.

V grafu je dobře viditelná absence tří násobků proudových harmonických. Tento jev je patrně částečně způsobený 6-pulsními usměrňovači v měnících Liberecké MHD.

Hodnoty napěťových/proudových harmonických, naměřených v jednotlivých měřeních, jsou uvedeny tabulkou č.07-12 v příloze č.3.

#### 4.2.8 Výpočty elektrických výkonových parametrů

Výpočty níže uvedených parametrů byly z naměřených průběhů provedeny použitím podprogramů z [23] softwarem MATLAB 6.5.

- **efektivní hodnota  $U_{ef}$**

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad [V] \quad (4.3)$$

- **efektivní hodnota  $I_{ef}$**

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad [A] \quad (4.4)$$

kde:  $T$  – perioda [s],

$t$  – čas [s].

Uvedené rovnice jsou univerzální a představují výpočet efektivních hodnot napětí a proudu pro obecný tvar periodického průběhu.

- **činný výkon  $P$**

Okamžitý elektrický výkon ve střídavých soustavách lze obecně definovat jako součin okamžitých hodnot napětí a proudu.

$$(4.5) \quad p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

Jsou-li průběhy proudu a napětí periodické se stejnou periodou, potom činný výkon je dán střední hodnotou okamžitého výkonu za periodu  $T$ . Tento výkon je možné chápat jako průměrný výkon během jedné periody.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad [W]$$

(4.6)

- **zdánlivý výkon  $S$**

$$(4.7) \quad S = U_{ef} \cdot I_{ef} \quad [VA]$$

- **jalový výkon  $Q$**

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad [VAr] \quad (4.8)$$

- **účinník  $\lambda$  (Power Faktor)**

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad [-] \quad (4.9)$$

Je zřejmé, že v obvodech s neharmonickými průběhy proudu a napětí nemá účinník význam cosinu úhlu fázového posuvu mezi nimi.

- **vrcholový činitel (*Crest Factor*)  $CF$**

$$(4.10) \quad CF = \frac{I_{\max}}{I_{ef}} \quad [-]$$

V praxi se stává, že se napájecí napětí vlivem neharmonického proudu zkresluje. Parametr, který toto zkreslení definuje je:

- **činitel harmonického zkreslení (*Total Harmonic Distortion*)  $THD$**

$$THD_U = \sqrt{\frac{U_{ef}^2 - U_1^2}{U_1^2}} \quad [-] \quad (4.11)$$

$$THD_I = \sqrt{\frac{I_{ef}^2 - I_1^2}{I_1^2}} \quad [-] \quad (4.12)$$

Pro harmonické, nezkreslené průběhy je  $THD_{U,I}=0$ .

Vztahy pro výpočty parametrů jsou odvozené pro harmonické průběhy. Jelikož jsou pro veškerá měření  $CF > \sqrt{2}$ ,  $THD_{U,I} > 0$  a jak je vidět z grafů č. 2 a 3, naměřené průběhy nemají harmonický (sinusový) průběh. Hodnoty parametrů jsou z tohoto důvodu a z důvodu popsaném v části 4.2.1 zatíženy početní chybou. Veškeré výsledné hodnoty parametrů jsou uvedeny tabulkou č.13-15 v příloze č.3. Dále budou výsledné parametry porovnávány ne jednotkově ale poměrově. Nelze porovnávat výsledky na vstupu do měniče s výsledky na výstupu z měniče.

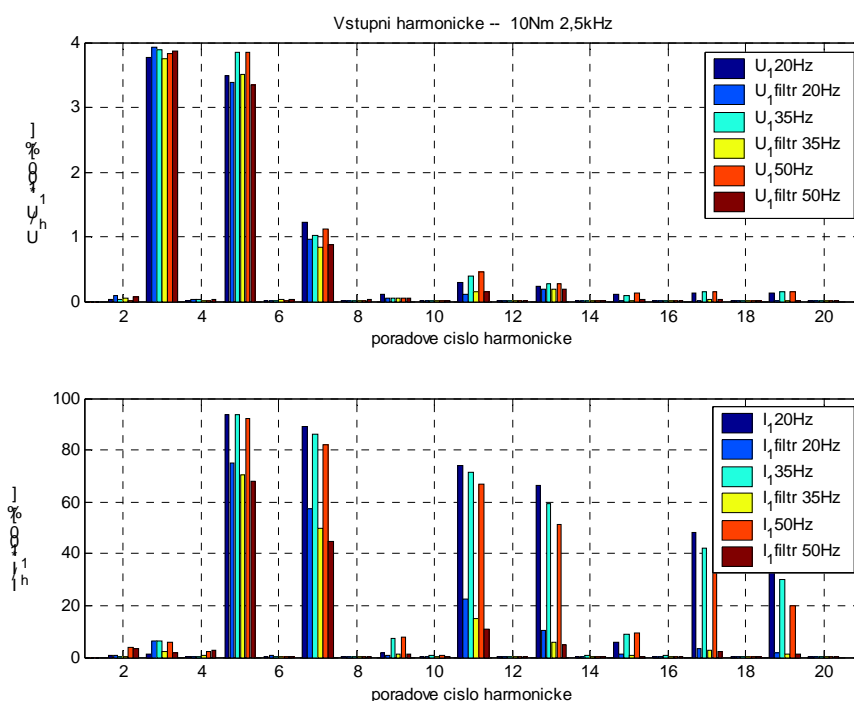
## 5. Výsledky experimentu

V této části jsou uvedeny vypočtené výsledky měření, které jsou porovnávány formou sloupcových grafů. Shoda s českými normami je uvedena formou tabulek.

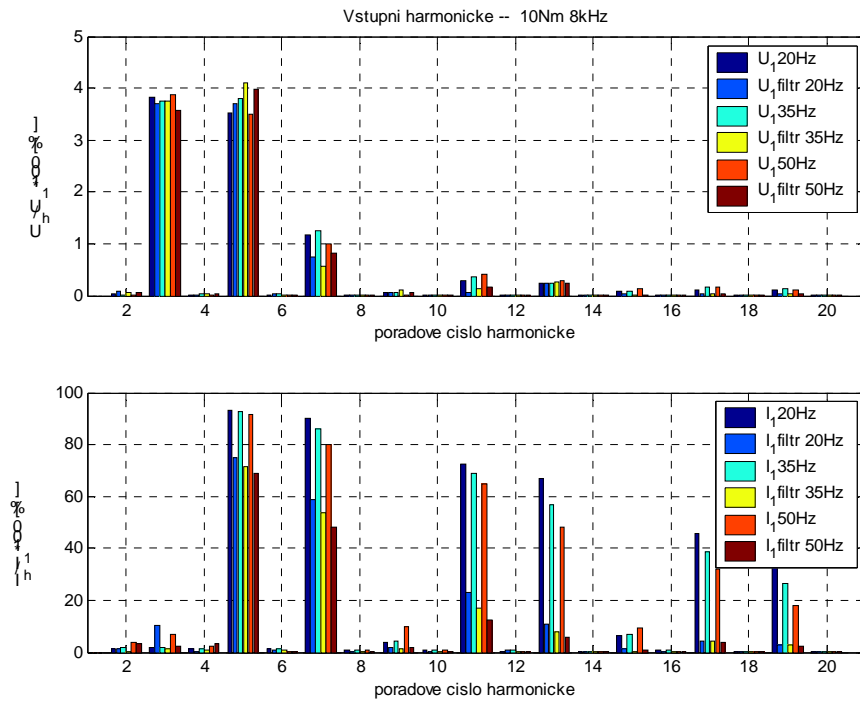
Níže jsou porovnány obsahy vyšších harmonických napětí/proudu pouze z měření na vstupu do soustavy. Na výstupu z měniče je obsah harmonických nízký a nedají se dost dobře určit závislosti vznikajícího rušení na nastavovaných parametrech.

Porovnání obsahu vyšších harmonických napětí/proudu na výstupu z měniče jsou uvedeny v příloze č.2 graf č.50-57. Z těchto grafů je patrné několikanásobně vyšší obsah 5. výstupní napěťové/proudové harmonické při frekvenci 50Hz než u ostatních frekvencí (20Hz; 35Hz;). Toto je způsobené pulsací napětí v meziobvodu měniče, protože se nastavená frekvence (50Hz) rovná frekvenci napájecí sítě (50Hz).

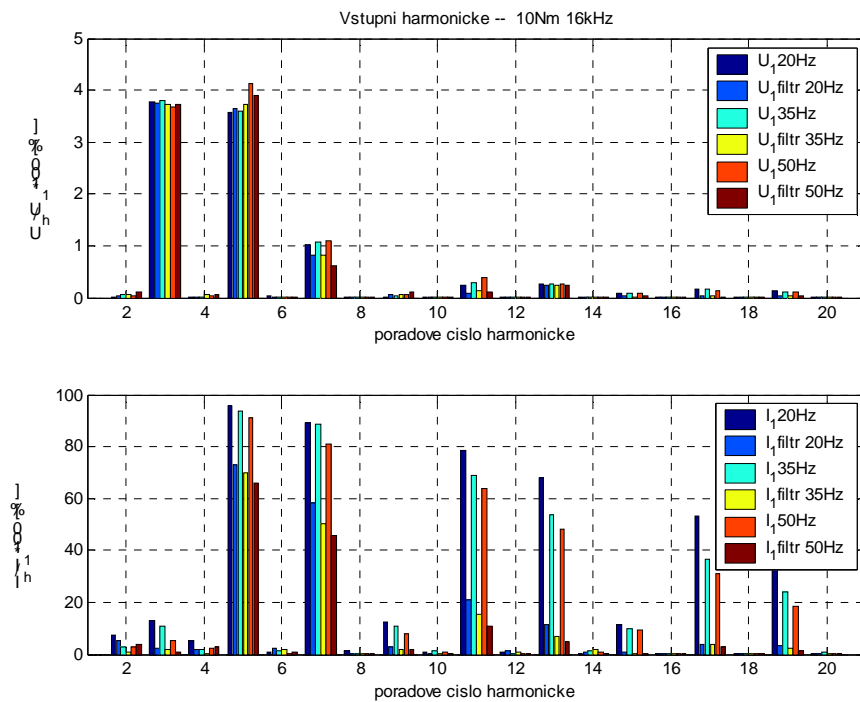
### 5.1 Porovnání vstupních harmonických při různých napájecích frekvencích



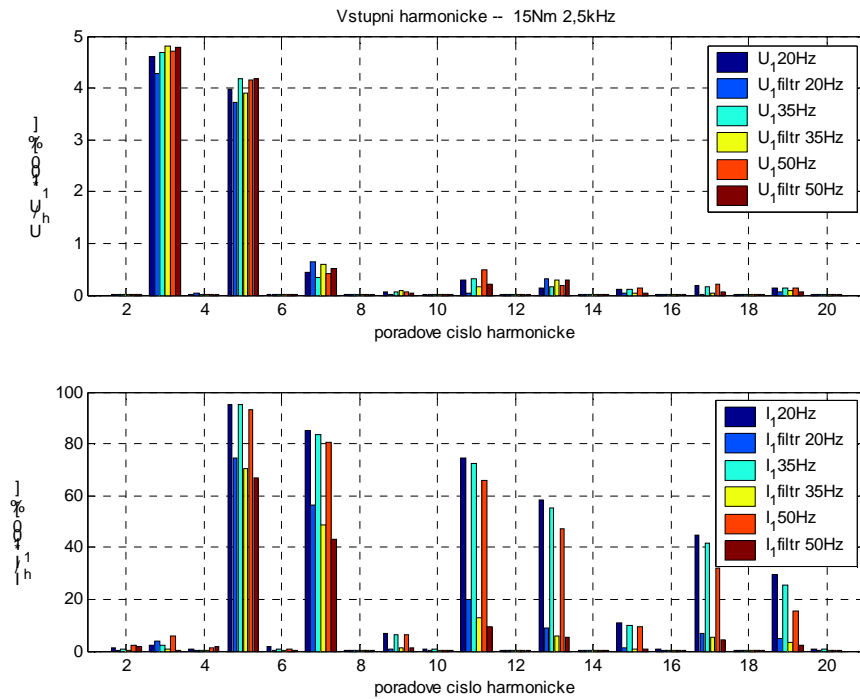
Graf č.07: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 10Nm a modulační frekvenci 2,5kHz



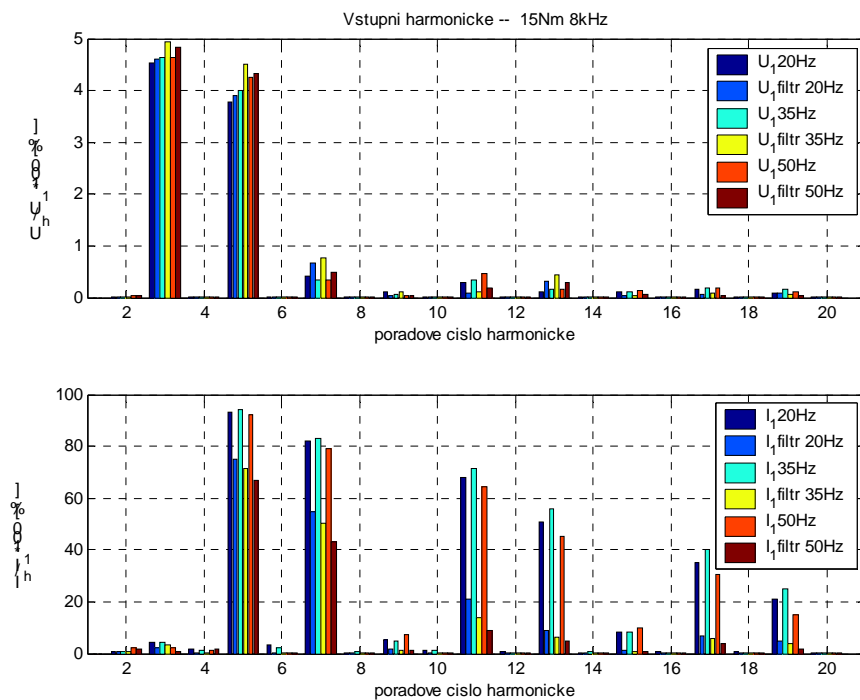
Graf č.08: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 10Nm a modulační frekvenci 8kHz



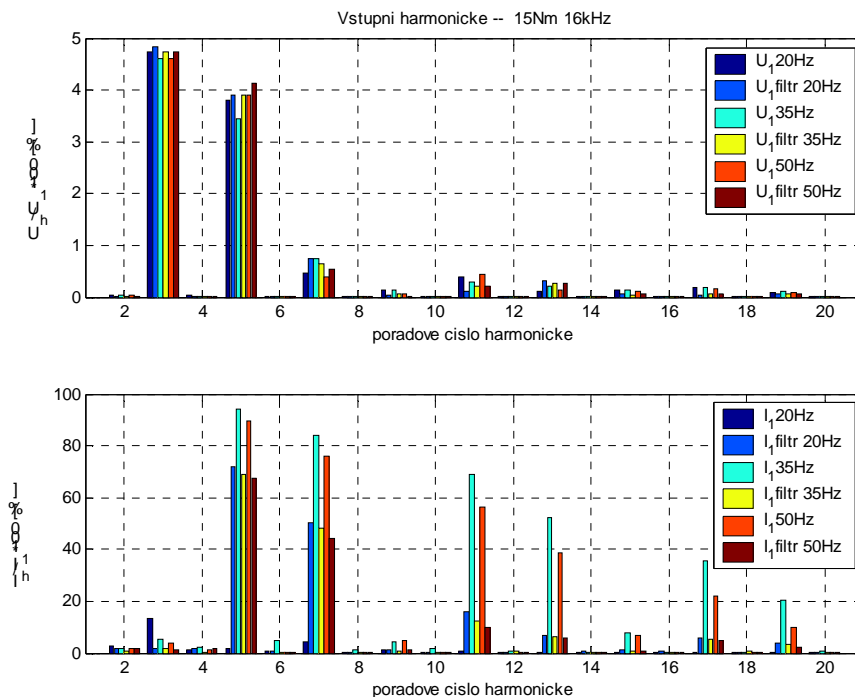
Graf č.09: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 10Nm a modulační frekvenci 16kHz



Graf č.10: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 15Nm a modulační frekvenci 2,5kHz



Graf č.11: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 15Nm a modulační frekvenci 8kHz

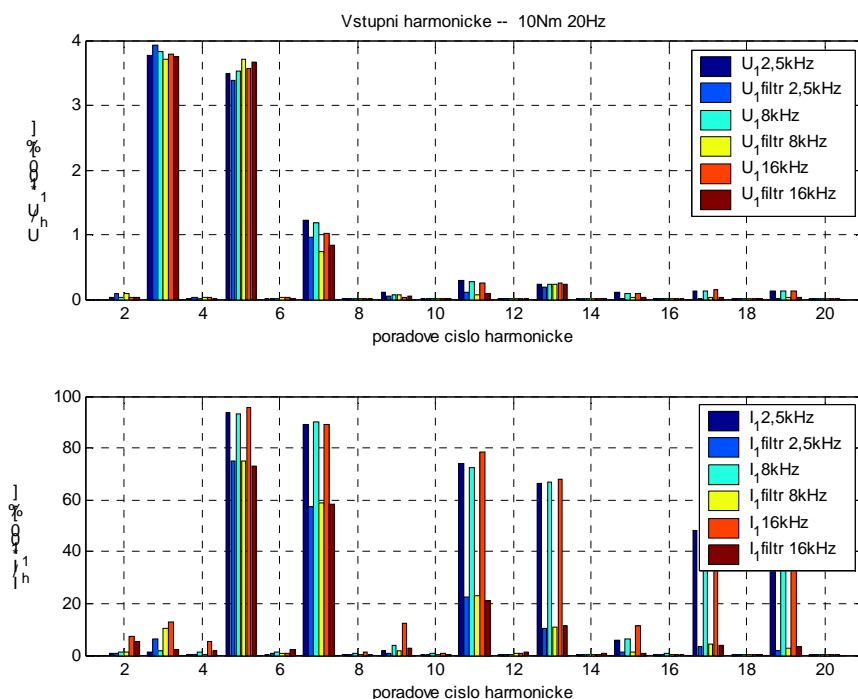


*Graf č.12: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 15Nm a modulační frekvenci 16kHz*

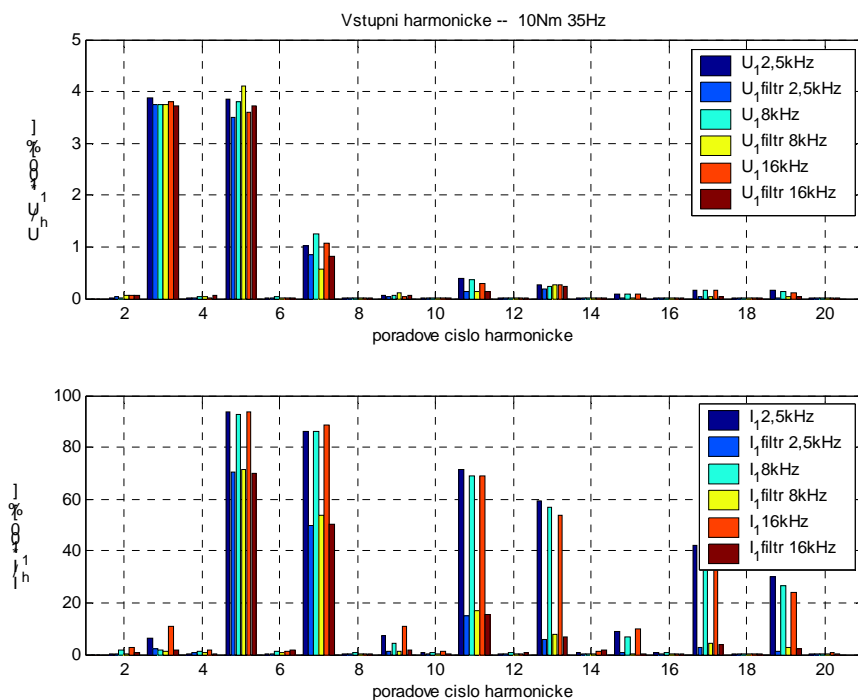
Grafy č.07-12 znázorňují porovnání vstupních harmonických napětí/proudu změřených na vstupu do měřené soustavy. Jsou zde porovnávány měřené napájecí frekvence (20; 35 a 50Hz) pro různé kombinace zatížení a modulační frekvence. Vlivem vstupního filtru je vidět výrazné zlepšení proudových harmonických. Velký podíl na tom má filtrační tlumivka, která je součástí vstupního filtru. Tlumivka výrazně snižuje proudové impulsy vzniklé usměrňovačem. Je patrné, že se vzrůstající frekvencí, klesá obsah harmonických. Napět'ové harmonické nižších řádů, se s filtrem nijak výrazně nemění. Filtr je založený na principu LC článku s mezní (zlomovou) frekvencí 150-180Hz. Odstraňuje harmonické vyšších řádů (8. a vyšší), aby nedocházelo k rezonanci a nezpůsoboval tak příliš velké ztráty energie.[12]



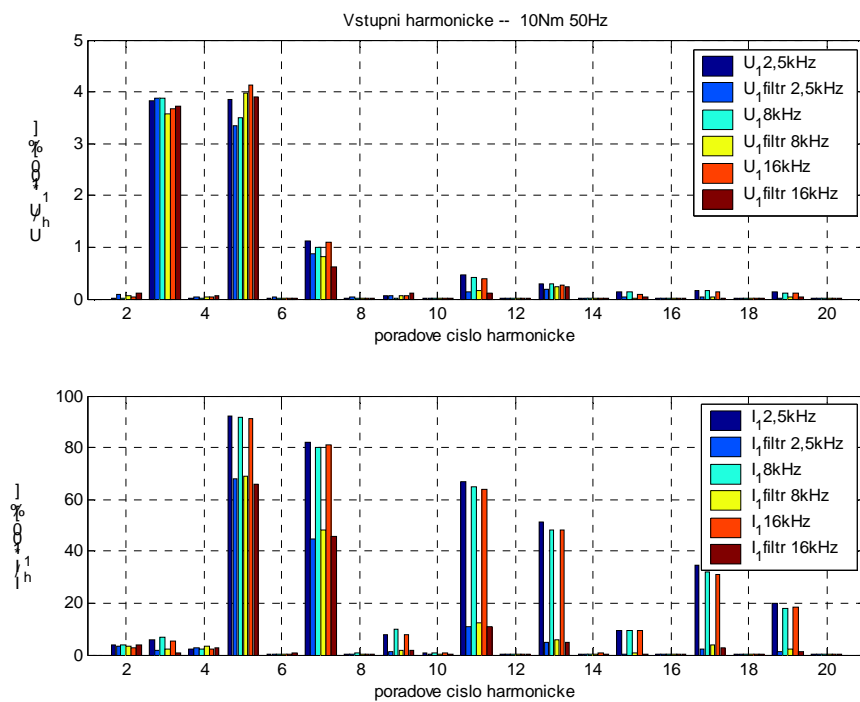
## 5.2 Porovnání vstupních harmonických při různých modulačních frekvencích



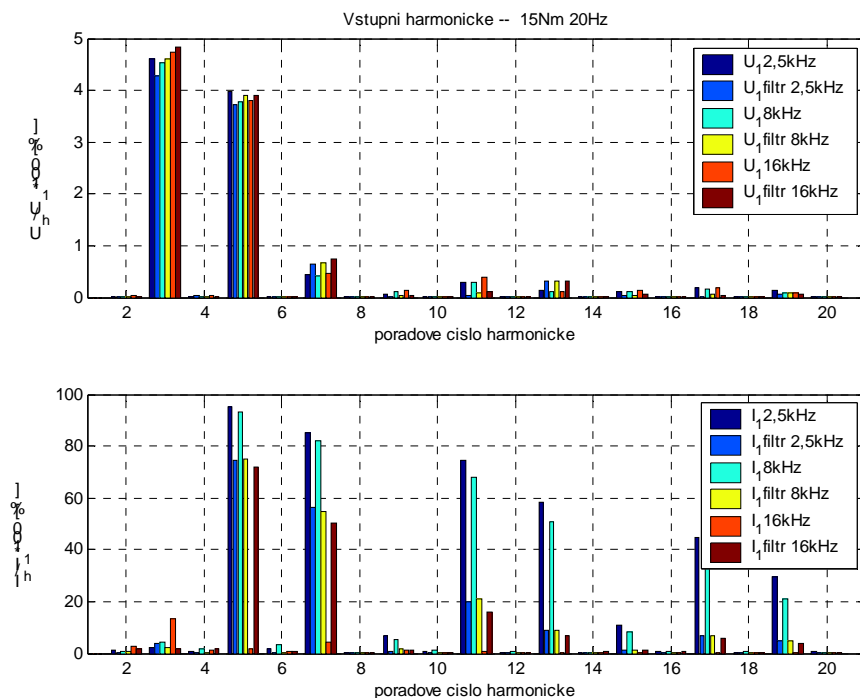
Graf č.13: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené modulační frekvence při zatížení 10Nm a frekvenci 20Hz



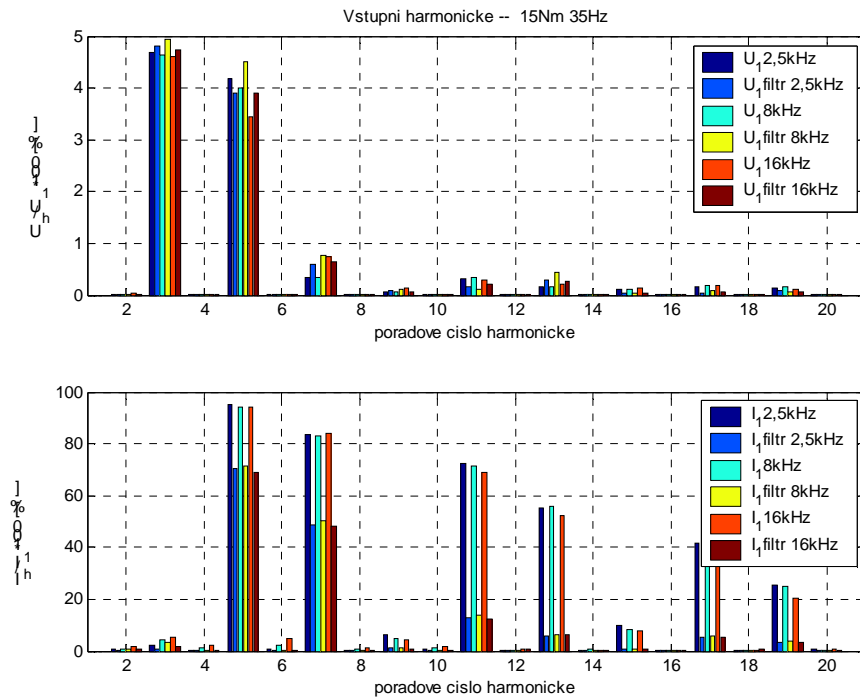
Graf č.14: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené modulační frekvence při zatížení 10Nm a frekvenci 35Hz



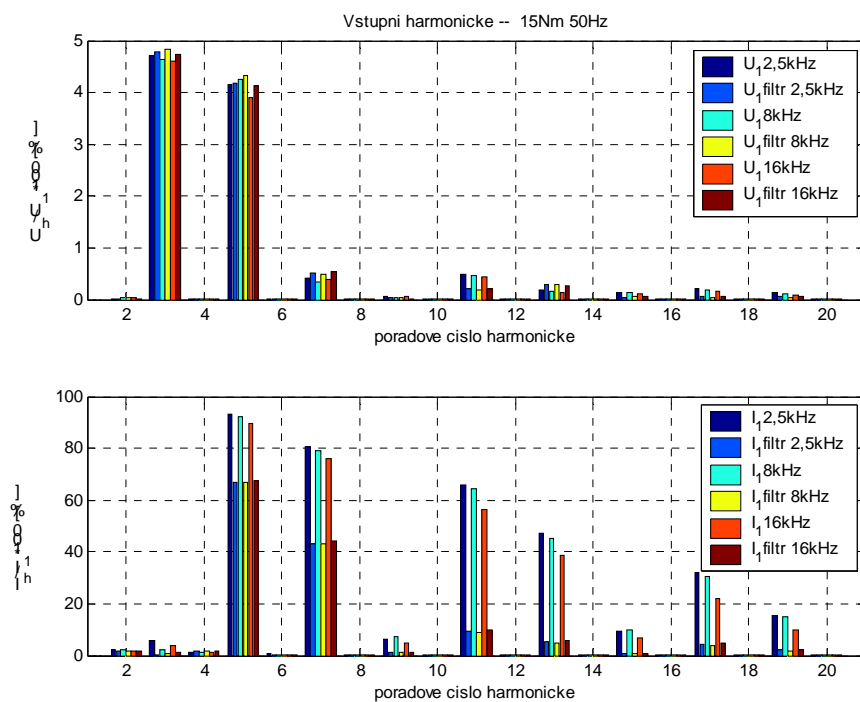
Graf č.15: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené modulační frekvence při zatížení 10Nm a frekvenci 50Hz



Graf č.16: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené modulační frekvence při zatížení 15Nm a frekvenci 20Hz



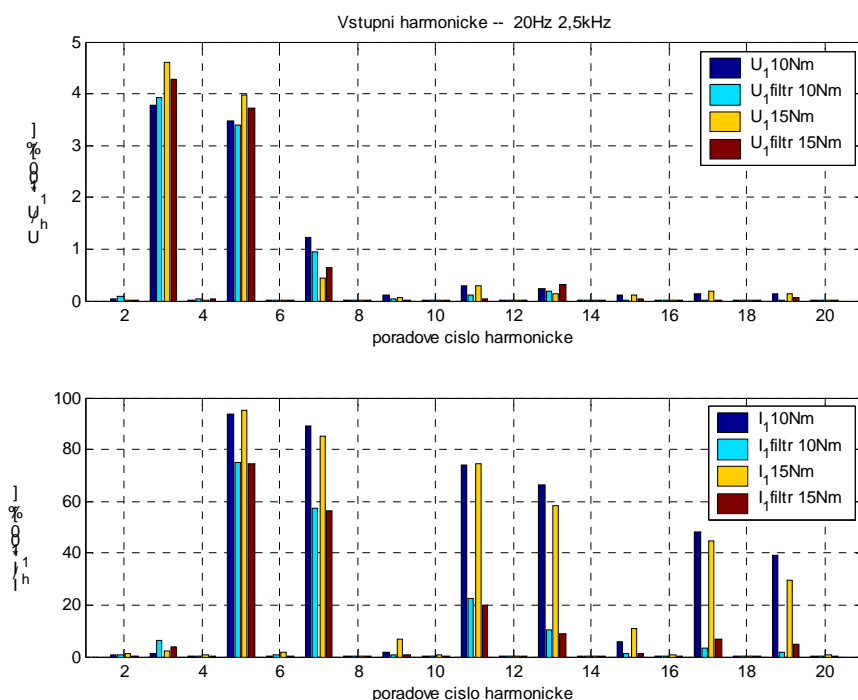
Graf č.17: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené modulační frekvence při zatížení 15Nm a frekvenci 35Hz



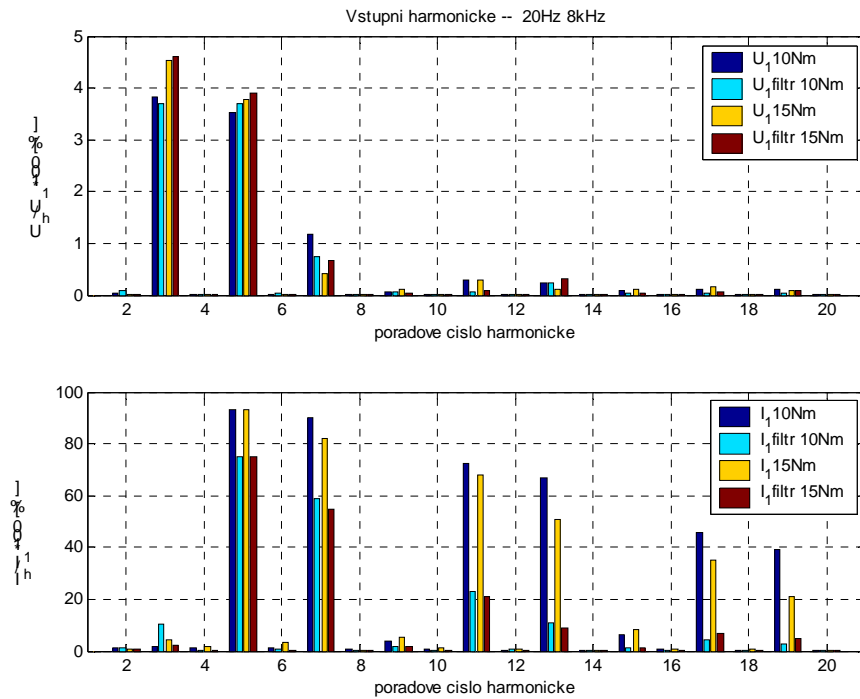
Graf č.18: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřené modulační frekvence při zatížení 15Nm a frekvenci 50Hz

Grafy č.13-18 znázorňují porovnání vstupních harmonických napětí/proudu změřených na vstupu do měřené soustavy. Jsou zde porovnávány měřené modulační frekvence (2,5; 8 a 16Hz) pro různé kombinace zatížení a napájecí frekvence. Je patrné, že se vzrůstající modulační frekvencí, klesá obsah harmonických. Zdůvodnění působení filtru na velikost harmonických je v předešlé části 5.1.

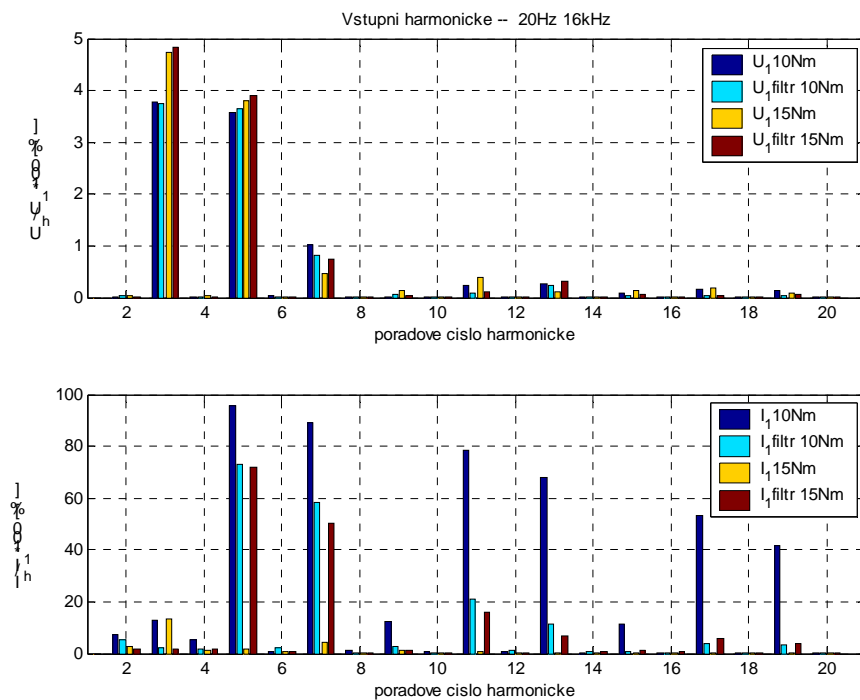
### 5.3 Porovnání vstupních harmonických při různém zatížení



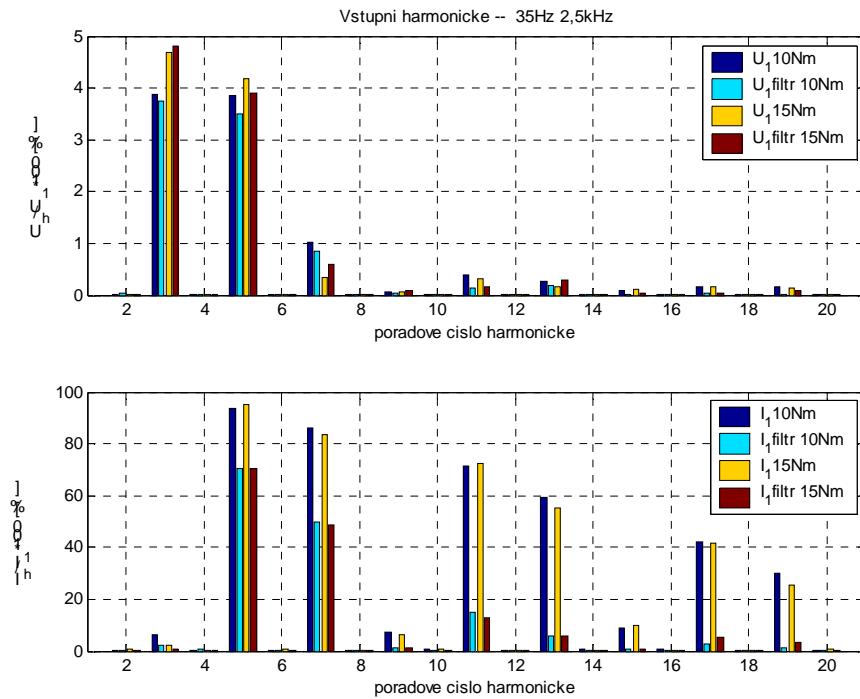
Graf č.19: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřená zatížení při frekvence 20Hz a modulační frekvenci 2,5kHz



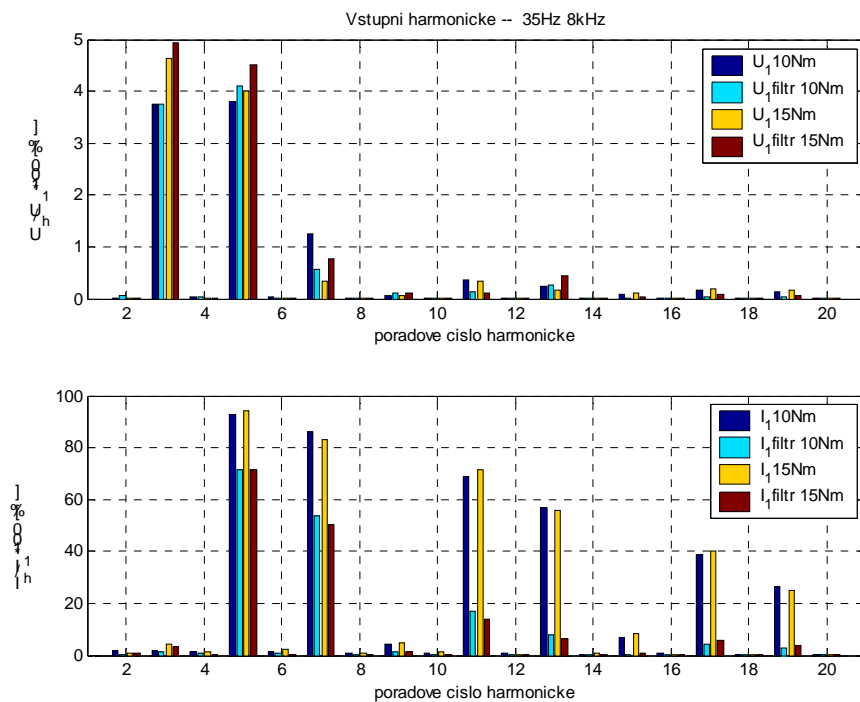
Graf č.20: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřená zatížení při frekvence 20Hz a modulační frekvenci 8kHz



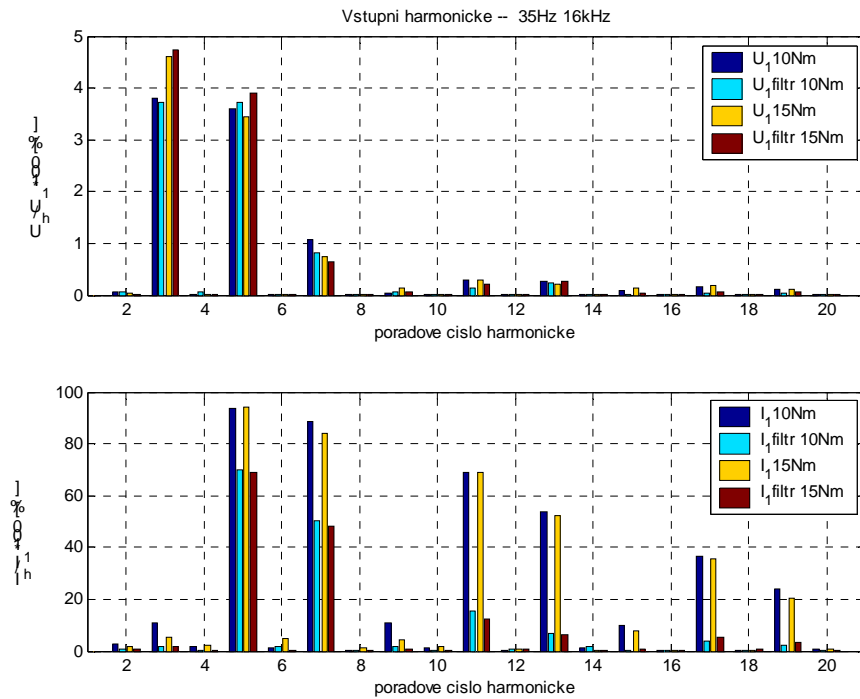
Graf č.21: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřená zatížení při frekvence 20Hz a modulační frekvenci 16kHz



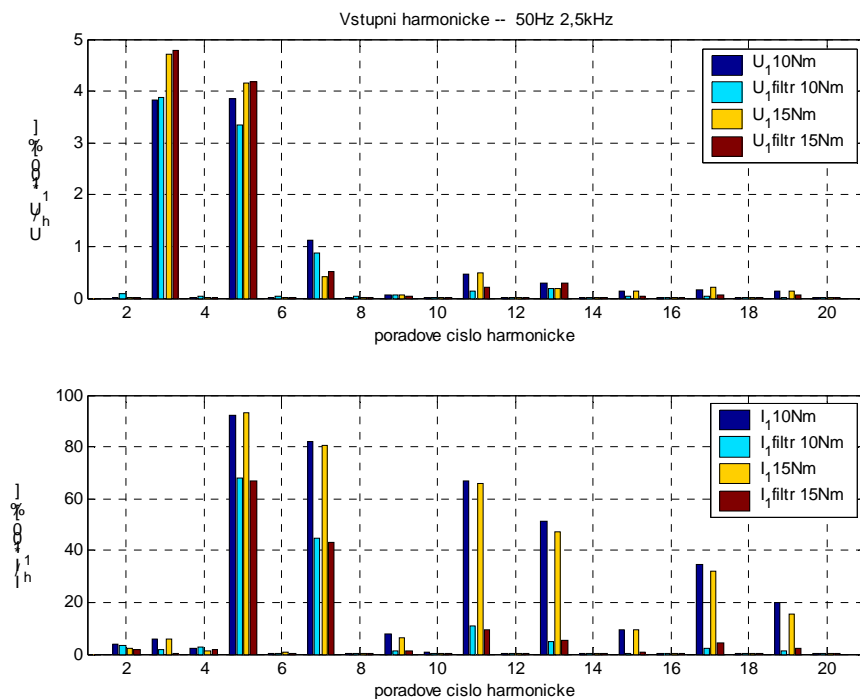
Graf č.22: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřená zatížení při frekvence 35Hz a modulační frekvenci 2,5kHz



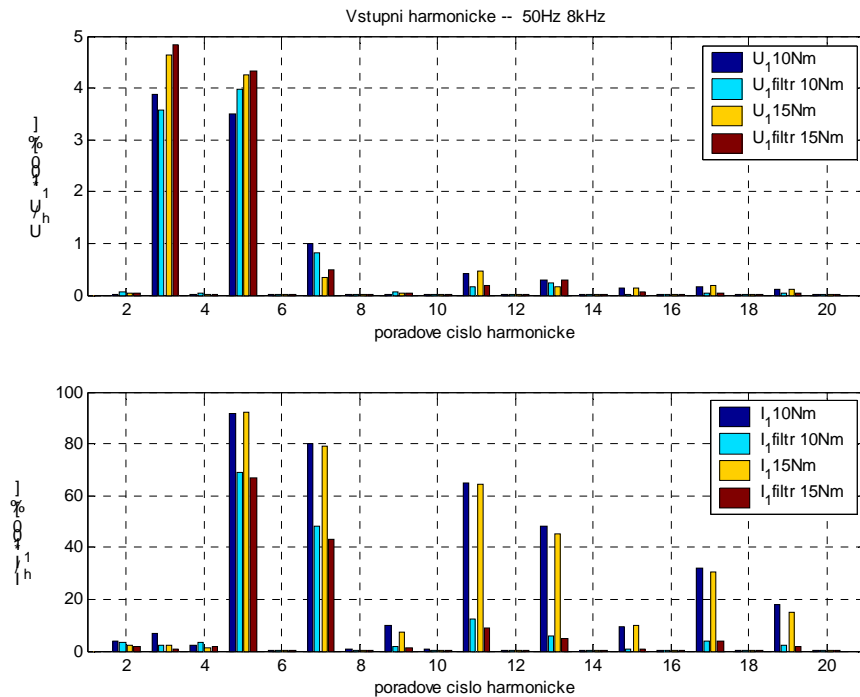
Graf č.23: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřená zatížení při frekvence 35Hz a modulační frekvenci 8kHz



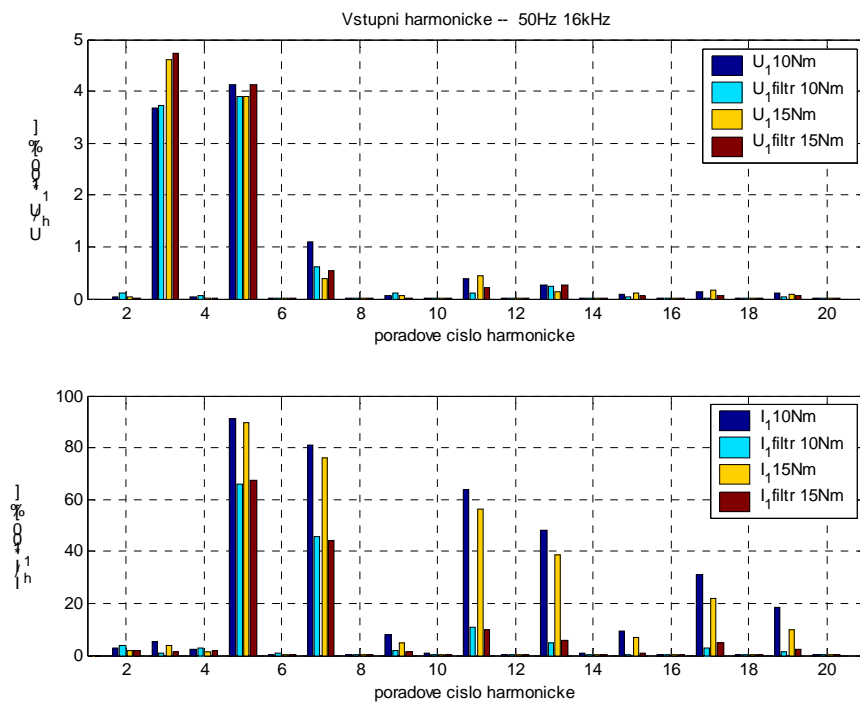
Graf č.24: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřená zatížení při frekvence 35Hz a modulační frekvenci 16kHz



Graf č.25: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřená zatížení při frekvence 50Hz a modulační frekvenci 2,5kHz



Graf č.26: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřená zatížení při frekvence 50Hz a modulační frekvenci 8kHz



Graf č.27: Porovnání vstupních harmonických napětí/proudu pro měřená zatížení při frekvence 50Hz a modulační frekvenci 16kHz



Grafy č.19-27 znázorňují porovnání vstupních harmonických napětí/proudu změřených na vstupu do měřené soustavy. Jsou zde porovnávána měření při jmenovitém zatížení 15Nm a sníženém zatížení 10Nm, pro různé kombinace napájecí frekvence a modulační frekvence. Výsledky ukazují, že velikost zatížení nemá přímý vliv na velikost harmonických. Zaleží spíše na zvolené velikosti napájecí frekvence a modulační frekvence. Zdůvodnění působení filtru na velikost harmonických je uvedeno v části 5.1.

## 5.4 Shoda s normami ČSN

Zda měřené zařízení splňuje meze určené normami, nebo jestli neovlivňuje charakteristiky sítě, či funkci jakéhokoli jiného zařízení připojeného na distribuční síť, upravují normy ČSN EN 61000-2-4 a ČSN EN 61000-3-2.

### 5.4.1 ČSN EN 61000-2-4

**Kompatibilní úroveň pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením v průmyslových závodech.** [24]

Měřená soustava byla zařazena do Třídy 3 a podle tabulky č.03 nedošlo při měření bez vstupního filtru a se vstupním filtrem k překročení mezí jednotlivých vstupních/výstupních napětíových harmonických.

- *Kompatibilní úrovně pro harmonické složky napětí [24]*

Liché mimo násobky 3		Liché, násobky 3		Sudé	
Řád harm.	Třída 3 [%] $U_h$	Řád harm.	Třída 3 [%] $U_h$	Řád harm.	Třída 3 [%] $U_h$
5	8	3	6	2	3
7	7	9	2,5	4	1,5
11	5	15	2	6	1
13	4,5	21	1,75	8	1
17	4	>21	1	10	1
19	4			12	1
23	3,5			>12	1
25	3,5				

### 5.4.2 ČSN EN 61000-3-2

**Meze pro emise harmonického proudu u zařízení se vstupním fázovým proudem  $\leq 16A$ .** [25] Měřená soustava byla posuzována podle *Třídy A*.

- *Mezní hodnoty vyšších harmonických [25]*

Spotřebiče třídy A	
Rád harm.	Max. proud [A]
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
15÷39	0,15·15/h
2	1,08
4	0,43
6	0,30
8÷40	0,23·8/h

Tabulka č.05 uvádí pro jaké vstupní vyšší harmonické byly překročeny limitní meze udané normou. Jednotlivé sloupce uvádějí procentuelní překročení limitu daného normou. V případě, že emise dané harmonické vyhovují normě, je toto pole proškrtnuto.

U výstupních proudových harmonických nedošlo k překročení limitu.

○ *Překročení mezí harmonických bez použití filtru*

Soubor č.	5. harm překročení v [%]	7. harm překročení v [%]	11. harm překročení v [%]	13. harm překročení v [%]	17. harm překročení v [%]	19. harm překročení v [%]
1	-	38	169	277	336	297
2	-	31	147	256	289	270
3	-	27	160	255	339	285
4	44	96	280	396	459	344
5	35	85	245	348	385	273
6	28	79	224	297	331	218
7	90	151	378	476	519	299
8	88	144	361	435	468	255
9	85	144	349	433	442	256
10	25	66	238	317	407	275
11	20	56	203	257	288	163
12	-	-	-	-	-	-
13	80	135	373	468	577	366
14	71	123	347	448	530	335
15	58	109	299	379	418	233
16	149	218	508	581	639	302
17	143	208	488	548	593	283
18	139	200	419	460	405	155

Zapojením vstupního filtru došlo k výraznému snížení emisí. K překročení došlo pouze u 5. a 7. harmonické, nejvýše o 80%. Výjimku tvoří soubor č. 36, kde nebyla splněna i 17. harmonická – tabulka č.06.

○ *Překročení mezí harmonických s použitím filtru*

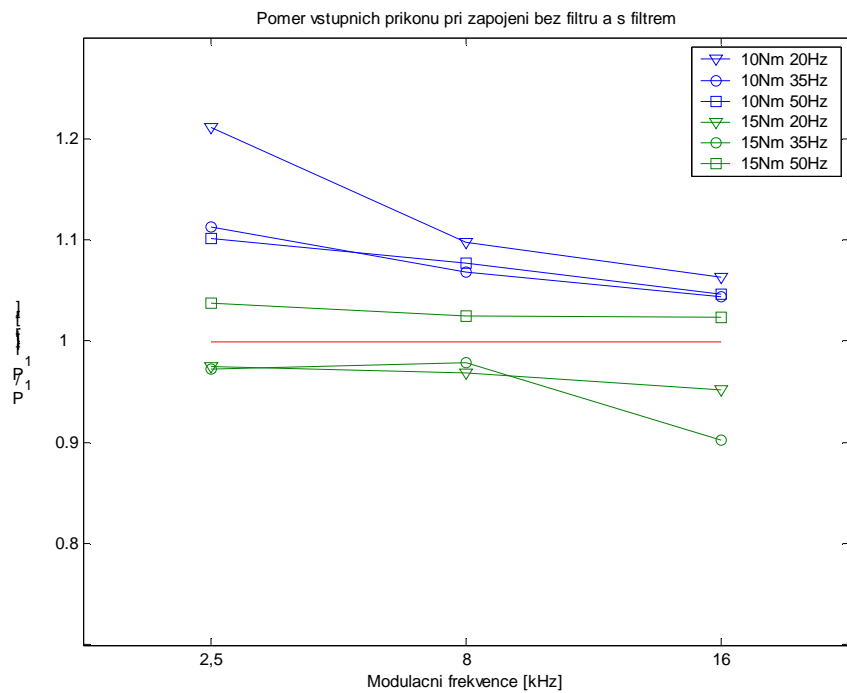
Soubor č.	5. harm	7. harm	11. harm	13. harm	17. harm	19. harm
	překročení v [%]	překročení v [%]	překročení v [%]	překročení v [%]	překročení v [%]	překročení v [%]
19	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-
22	-	3	-	-	-	-
23	-	9	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-
25	30	26	-	-	-	-
26	35	39	-	-	-	-
27	30	35	-	-	-	-
28	3	15	-	-	-	-
29	1	10	-	-	-	-
30	11	15	-	-	-	-
31	41	45	-	-	-	-
32	35	40	-	-	-	-
33	32	36	-	-	-	-
34	78	71	-	-	-	-
35	78	70	-	-	-	-
36	82	75	-	-	8	-

## 5.5 Porovnání elektrických výkonových parametrů

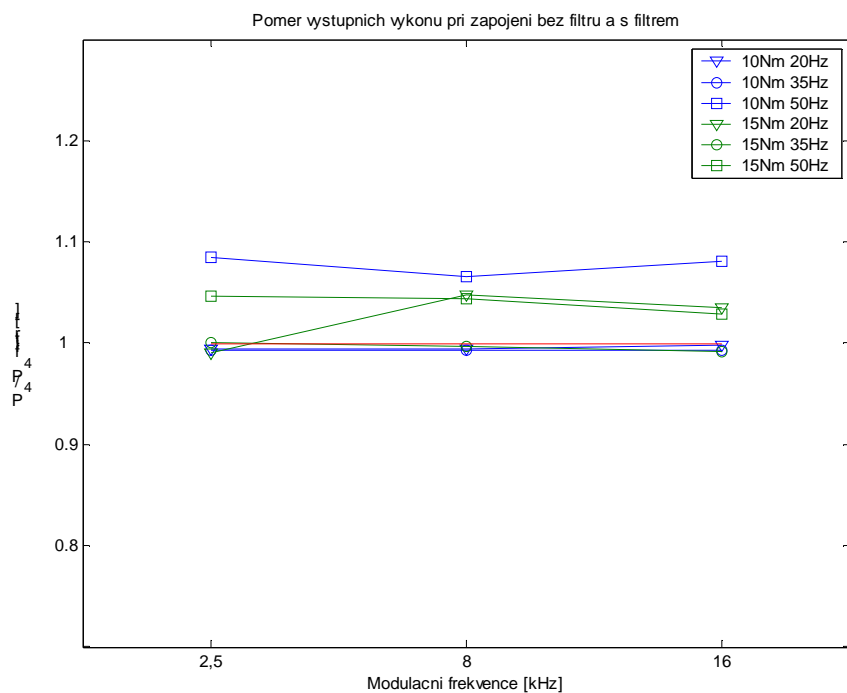
Jak již bylo vysvětleno v části 4.2.8 jsou zde mezi sebou porovnávány poměry vstupních a výstupních parametrů. Jalový výkon  $Q$  a zdánlivý výkon  $S$  nemají pro neharmonické napájení žádnou vypovídající hodnotu, proto budou dále porovnávány pouze činné výkony  $P$ .

Z následujících grafů č.28; 30 a tabulky č.13-15 v příloze č.3 je patrné, že při snížené zátěži (10Nm) se činný výkon s rostoucí modulační frekvencí snižuje a soustava je energeticky úspornější. Pro jmenovité zatížení (15Nm) tento předpoklad neplatí.

V grafu č.28 jsou porovnávány vzájemné poměry vstupních příkonů = výkonů, kde  $P_I$  je vypočtený příkon do měřicí soustavy bez zapojeného filtru,  $P_{I\text{ filtr}}$  je vypočtený příkon do měřicí soustavy se zapojeným vstupním filtrem. Pokud je v grafech č.28 a 29 vzájemný poměr  $>1$ , došlo zapojením filtru k úspoře energie.

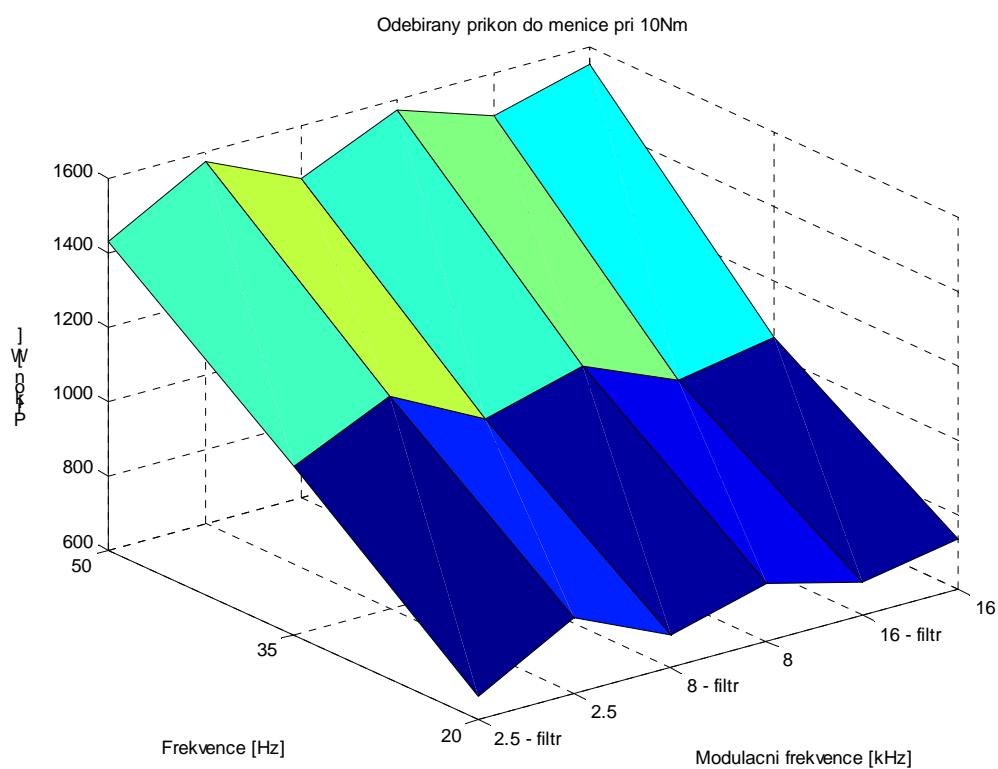


Graf č.28: Porovnání vstupních příkonů při zapojení bez filtru a s filtrem

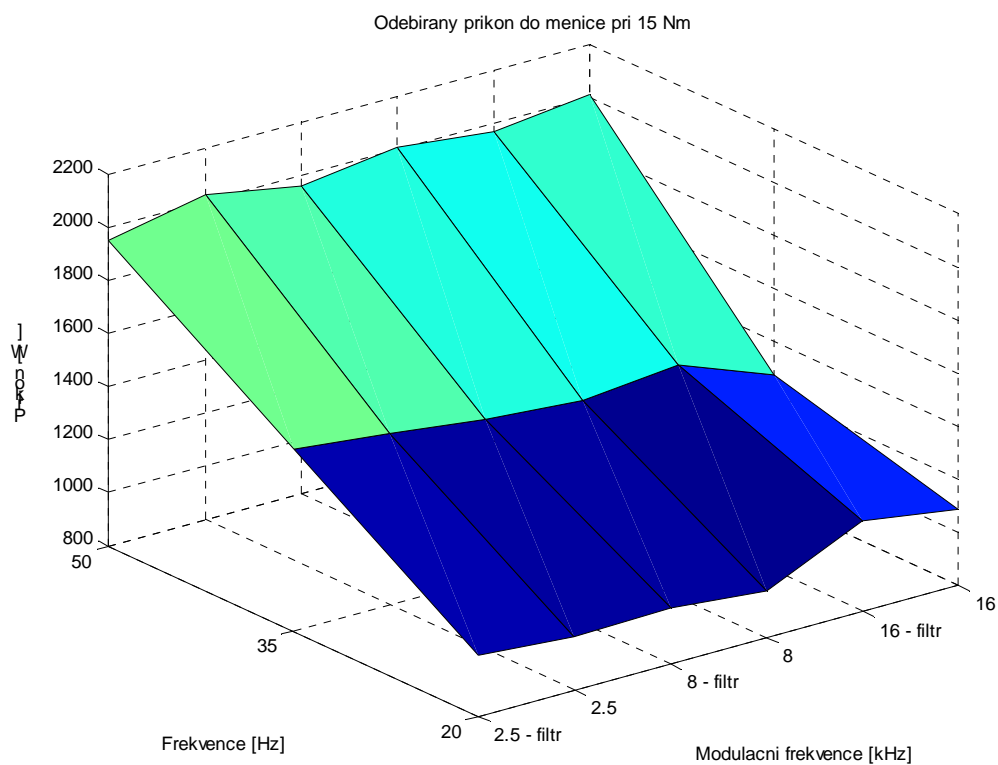


Graf č.29: Porovnání výstupních výkonů při zapojení bez filtru a s filtrem

V grafu č.29 jsou porovnávány vzájemné poměry výstupních výkonů, kde  $P_4$  představuje vypočtený výkon za měničem frekvence bez zapojeného vstupního filtru a  $P_4 \text{ filtr}$  je vypočtený výkon za měničem frekvence se zapojeným vstupním filtrem.



*Graf č.30: Prostorové porovnání vstupních příkonů při zatížení 10Mm*



*Graf č.31: Prostorové porovnání vstupních příkonů při zatížení 15Nm*

## 6. Diskuse výsledků

Soustava frekvenční měnič – ASM byla proměřena, pro různé zatížení motoru (10Nm; 15Nm), různé frekvence napájecího napětí (20Hz; 35Hz; 50Hz) a různé modulační (spínací) frekvence (2,5kHz; 8kHz, 16kHz).

Měření byla provedena v sadách po dvou, první s odpojeným a druhé se zapojeným vstupním pasivním filtrem. Při srovnání výsledků z těchto sad bylo zjištěno, že připojení vstupního filtru má podstatný vliv na měřené odběry energie (grafy č.28; 29 a tab.č.13-15 v příloze č.3).

Z naměřených průběhů (graf č.01 a grafy č.32-40 v příloze č.1) je viditelná deformace vstupního napětí. Tato deformace je způsobena měkkou školní sítí, na kterou působí zářivková tělesa a zdroje počítačů. Na průběhu vstupního proudu je patrný obsah vyšších harmonických, kterými tak měnič rušivě působí na napájecí síť. Při zapojení vstupního filtru toto rušení prochází i přes tento filtr (graf č.02 a grafy č.41-49 v příloze č.1).

Výstupní napětí/proud za měničem frekvence má průběh velice podobný sinusovému. To, jaký má výstupní napětí/proud průběh, záleží na zvolené modulační frekvenci měniče. S nižšími modulačními frekvencemi (2,5 a 8kHz) jsou průběhy rozkmitané (graf č.01; 02 a grafy č.32-49 v příloze č.1).

Vlivem usměrňovače, který je součástí frekvenčního měniče, dochází ke znatelné deformaci průběhu vstupního proudu. Průběh proudu nemá sinusový tvar, ale tvoří jej dva impulsy v každé půl-periodě napětí. Zapojením vstupního filtru došlo ke snížení velikosti proudových impulsů až na polovinu původní hodnoty. Průběh vstupního proudu je méně rušený a proudové impulsy jsou nižší a širší. Naměřené průběhy s filtrem a bez filtru nesou stejnou energii, plocha pod křivkami musí být stejná (graf č.03).

Vlivem indukčnosti zapojené vstupní filtrační tlumivky způsobují proudové impulsy deformaci vstupního napětí do měniče frekvence. Na začátku proudového impulsu dochází k propadu průběhu napětí a na konci impulsu dochází k vyrovnání předchozího úbytku napětíovou špičkou (graf č.02 a grafy č.41-49 v příloze č.1).

Porovnáním obsahu vyšších harmonických, vypočtených z naměřených průběhů rychlou Fourierovou transformací (FFT), lze odvodit následující závislosti. Vlivem vstupního filtru je vidět výrazné zlepšení vstupních proudových harmonických, velký podíl na tom má filtrační tlumivka, která je součástí vstupního filtru. Tlumivka výrazně snižuje proudové impulsy vzniklé usměrňovačem.

Je patrné, že:

- se vzrůstající frekvencí napájecího napětí, klesá obsah harmonických,
- se vzrůstající modulační frekvencí, klesá obsah harmonických,
- velikost zatížení nemá přímý vliv na velikost harmonických.

Vstupní napěťové harmonické nižších řádů se zapojením vstupního filtru výrazně nemění a nelze odvodit závislosti s nastavovanými parametry. Vstupní filtr je založen na principu LC článku a odstraňuje harmonické vyšších řádů (8. a vyšší), aby nedocházelo k rezonanci a nezpůsoboval příliš velké ztráty energie.[12]

Na výstupu z měniče je obsah harmonických nízký a nedají se určit závislosti vznikajícího rušení na nastavovaných parametrech. Vzniká několikanásobně vyšší obsah 5. výstupní napěťové/proudové harmonické při frekvenci 50Hz než u ostatních frekvencí (20Hz; 35Hz;). Toto je způsobené pulsací napětí v meziobvodu měniče, protože se nastavená frekvence (50Hz) rovná frekvenci napájecí sítě (50Hz) – (grafy č.50-57 v příloze č.2).

Obsah vyšších harmonických byl posuzován podle normy ČSN EN 61000-3-2 „Meze pro emise harmonických proudů , zařízení se vstupním fázovým proudem do 16 A včetně“ třída spotřebiče A (symetrický trojfázový spotřebič, atd.). U všech měření se zapojením bez vstupního filtru byly překročeny požadavky na emise vyšších harmonických vstupních proudů dané touto normou. Při zapojení vstupního filtru došlo k výraznému snížení překročení požadavků daných normou (tab.č.07-12 v příloze č.3). Emise vyšší harmonické výstupních proudů překročeny nebyly. Výstupní napětí/proudu je za měničem vytvářeno střídačem s výkonnými polovodičovými součástkami. Pomocí pulsně-šířkové modulace jsou průběhy téměř sinusové a obsahují málo vyšších harmonických.

Podle normy ČSN EN 61000-2-4 „Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením v průmyslových závodech“ třída spotřebiče 3 byly u všech vstupních/výstupních měření splněny požadavky na emise neharmonických napětí dané touto normou (tab.č.07-12 v příloze č.3).

Vypočítané výsledky elektrických výkonových parametrů ( $U_{ef}$ ,  $I_{ef}$ ,  $P$ ,  $Q$ ,  $S$ ,  $PF$ ,  $THD$ ,  $CF$ ) jsou zatíženy početní chybou a to z těchto důvodů. Naměřená data po zpracování přístrojem EMU 2 už neobsahují veškeré frekvence obsažené v původním signálu (část 4.2.1). Vztahy (4.3-4.12) pro výpočty parametrů odvozené pro periodické veličiny byly použity pro neharmonické průběhy napětí/proudu. Protože by bylo nesprávné porovnávat tyto výkonové parametry v jednotkových hodnotách, jsou porovnávány ve vzájemných poměrech. Nelze porovnávat výsledky na vstupu do měniče frekvence s výsledky na výstupu z měniče frekvence. Jalový výkon  $Q$  a zdánlivý výkon  $S$  nemají pro neharmonické napájení žádnou vypovídající hodnotu, proto byly porovnávány pouze činné výkony  $P$ . Porovnáním bylo

zjištěno, že při snížené zátěži (10Nm) se činný výkon s rostoucí modulační frekvencí snižuje a soustava je energeticky úspornější. Pro jmenovité zatížení (15Nm) tento předpoklad neplatí (grafy č.28-31).

Při nahrazení 1,7m dlouhého nestíněného napájecího kabelu 10,3m dlouhým nestíněným napájecím kabelem, nevznikly prakticky žádné rozdíly na vedeném napájení či vzniklém nf rušení.

Experiment měl také zahrnovat měření s výstupním pasivním filtrem připojeným za měnič frekvence. Při tomto zapojení se nepodařilo uvést soustavu do chodu a nebyla naměřena žádná data, která by bylo možno dále zpracovávat.

## **7. Závěr**

Měření byla provedena na měřícím pracovišti označené „Simovert/Simoreg“ v laboratoři katedry elektrotechniky EL2. Analyzovány byly dvě různá zapojení, asynchronní motor napájený z měniče frekvence bez zapojeného vstupního filtru a se zapojeným vstupním



filtrem. Byla provedena harmonická analýza emisí napěťových/proudových vyšších harmonických, způsobených frekvenčním měničem. Výsledky byly kontrolovány podle zmíněných norem. K výraznému překročení mezí daných normami, došlo u vstupních napěťových vyšších harmonických. Při použití vstupního filtru se emise výrazně snížily a některé se podařilo zcela odfiltrovat.

Bylo zjištěno, že největší vliv na snížení emisí napěťových vyšších harmonických má filtrační tlumivka, která je součástí vstupního filtru. Ke snížení napěťových vyšších harmonických došlo až u vyšších řádů na vyšších frekvencích.

Porovnáním vstupních příkonů do soustavy bylo zjištěno, že zapojením vstupního filtru je soustava energeticky úspornější. Filtr svou funkcí část příkonu spotřebovává, a tato spotřeba je kompenzována odstraněním vyšších harmonických, které jsou příčinou vzniku ztrát.

Během zpracovávání výsledků měření se ukázalo, že měřicí přístroj EMU 2 je pro měření průběhů ovlivněných měničem frekvence nevhodný. Vzorkovací frekvence přístroje (12,8kSs) je vzhledem k modulačním frekvencím nastavovaným v měniči nedostačující.

Propojení asynchronního motoru a měniče dlouhým napájecím kabelem neprokázalo výrazné odchylky od propojení krátkým kabelem. Odchylky ve formě napěťových/proudových špiček začínají vznikat u napájecích kabelů dlouhých přes třicet metrů.[9]

Jelikož použitý pasivní vstupní filtr neodstranil všechny nežádoucí vyšší harmonické, mohl by se nahradit aktivním vstupním filtrem. Ten produkuje stejné úrovně rušivých harmonických, avšak v opačné fázi. Tyto dvě úrovně harmonických se v bodě spojení navzájem eliminují. Aktivní filtr je nákladnější a produkuje vyšší ztráty.

Další možností je použití PFC korektoru (elektronický korektor účinníku), který se chová jako odpor a ze sítě odebírá čistý sinusový průběh. Korektor je zdrojem stejnosměrného napětí, tímto nahrazuje funkci usměrňovače. Univerzita zatím žádný PFC korektor nevlastní.

## 8. Použitá literatura

- [1] Pavelka,J., Čerovský,Z., Javůrek,J.: Elektrické pohony, ČVUT Praha 2001,
- [2] Caha,Z., Černý,M.: Elektrické pohony, SNTL Praha 1990
- [3] Konečná,E.: Konference „Optimalizace energetické náročnosti železniční dopravy XI“, OENŽD XI 2002,

- [4] Mikulanin, P., Vrána, V.: Rušení výstupními obvody měničů kmitočtu, III. Konference „Energetické rušení v distribučních a průmyslových sítích“, ERU' 98,
- [5] Čadil, F.: Elektrické pohony a dráhy, SNTL Praha 1963,
- [6] Bulgakov, A., A.: Řízení asynchronních motorů měniči frekvence, Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1989,
- [7] Vondrášek, F.: Výkonová elektronika, Západočeská univerzita, Plzeň 2001
- [8] Žabka, M.: Vliv napěťového měniče kmitočtu na parametry asynchronního motoru, Diplomová práce, TU v Liberci, 2002,
- [9] Vaculíková, P., Vaculík, E.: Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů, Grada Publishing 1998,
- [10] Danfoss, s.r.o.: Zpětné působení měničů kmitočtu na síť, časopis Elektro: 9/2000,
- [11] Lexa, V.: Harmonické – lepší prevence než náprava, časopis Elektro: 4/2000,
- [12] Norma ČSN EN 61800-3: Systémy elektrických výkonových pohonů s nastavitelnou rychlostí – Část 3: EMC – norma výrobku zahrnující specifické zkušební metody, 1998,
- [13] Richter, A., Konečná, E., Rydlo, P.: Harmonické zkreslení napájecí sítě, jeho definice, měření a praxe, TU v Liberci, 1998,
- [14] Žáček, J.: Elektromagnetická kompatibilita výkonových systémů, Průvodní zpráva grantu GAČR 102/97/1254, Praha 1997,
- [15] Černý, V.: Rozběh asynchronních motorů s klecovou kotvou, časopis Elektro 3/1997,
- [16] Černý, V.: Asynchronní motory provozované s měniči, časopis Elektro 11/1998,
- [17] Šmíd, J.: Vliv měničů na síť a požadavky energetiky, časopis Elektrotechnik, 7-8/1988,
- [18] Richter, A., Konečná, E., Rydlo, P.: Laboratorní pracoviště pro simulaci regulačních elektrických pohonů, Symep 2002, TU v Liberci,
- [19] Norma ČSN EN 61000-4-7: Elektromagnetická kompatibilita – Část 4: Zkušební a měřicí techniky, 1994,
- [20] Žabka, M.: Určení parametrů náhradního schéma motorů v elektrickém pohonu, Projekt, TU v Liberci, 2000,
- [21] Cerna, M., Harvey, A., F.: The fundamentals of FFT – Based signal analysis and measurement, National Instruments, 2000, [www.in.com](http://www.in.com),
- [22] Kůs, V.: Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu, BEN, Praha 2002,
- [23] Svatošová, V.: Analýza a vizualizace výkonových parametrů z oscilogramů získaných signálovým procesorem, Diplomová práce, TU v Liberci, 2002,

- [24] Norma ČSN EN 61000-2-4: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 2-4: Prostředí – Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením v průmyslových závodech, 2003,
- [25] Norma ČSN EN 61000-3-2: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 3-2: Meze – Meze pro emise harmonického proudu (zařízení se vstupním fázovým proudem do 16 A včetně), 2001.

## **9. Seznam příloh**

Příloha I. – Grafy průběhů naměřených dat.

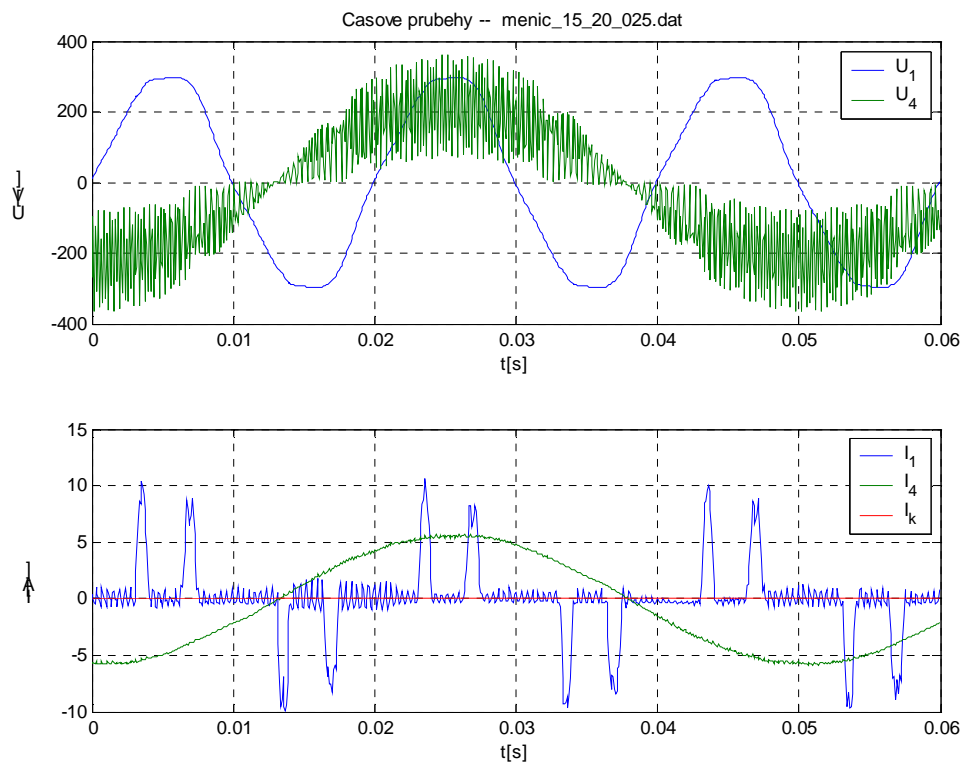
Příloha II. – Grafy s porovnáním výstupních vyšších harmonických.

Příloha III. – Tabulky hodnot vstupních/výstupních harmonických a vypočtených elektrických výkonových parametrů.

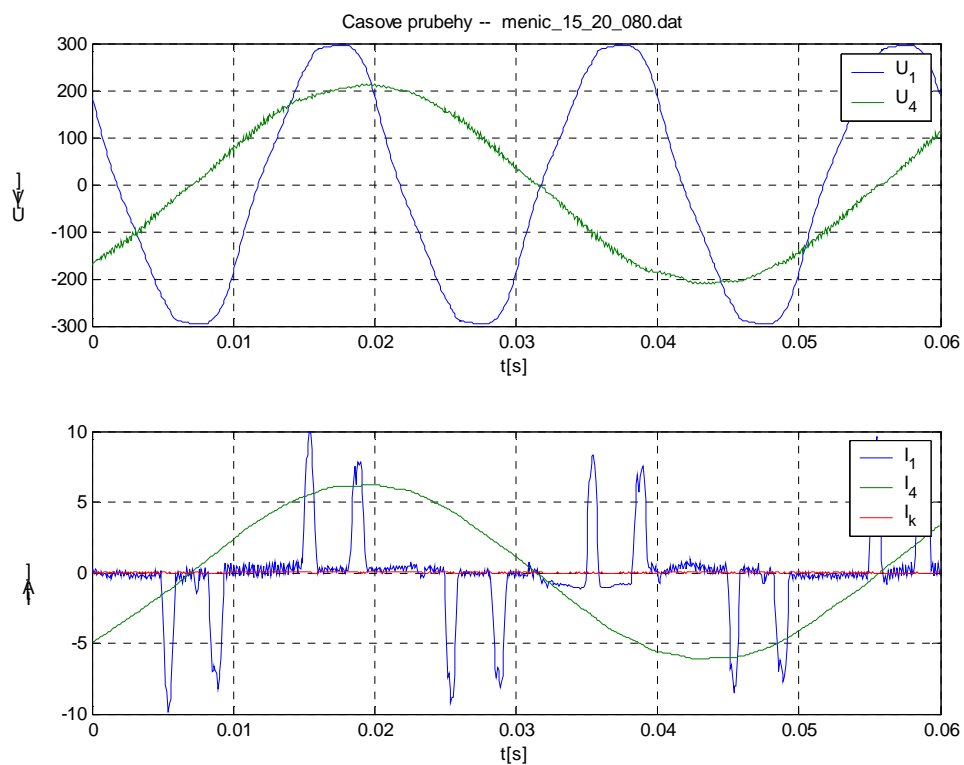
## **Příloha I.**

Grafy průběhů naměřených dat

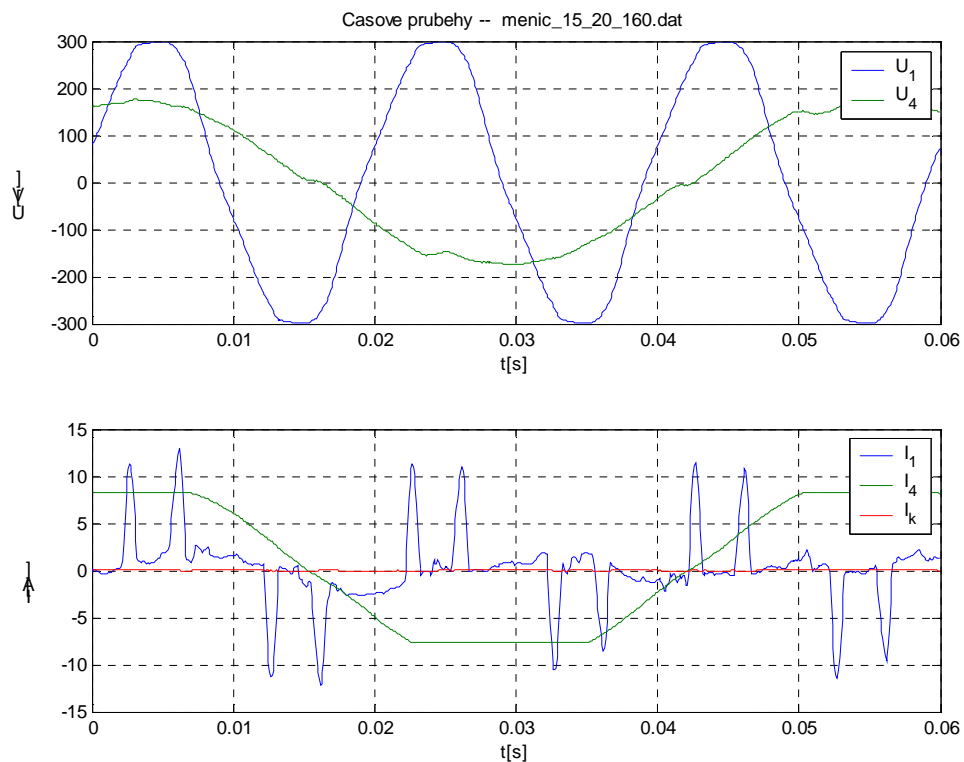
( V průbězích při sníženém zatížení 10Nm a zatížení 15Nm není viditelný rozdíl. V této příloze jsou uvedeny pouze průběhy naměřených vstupních/výstupních napětí/proudů při zatížení 15Nm)



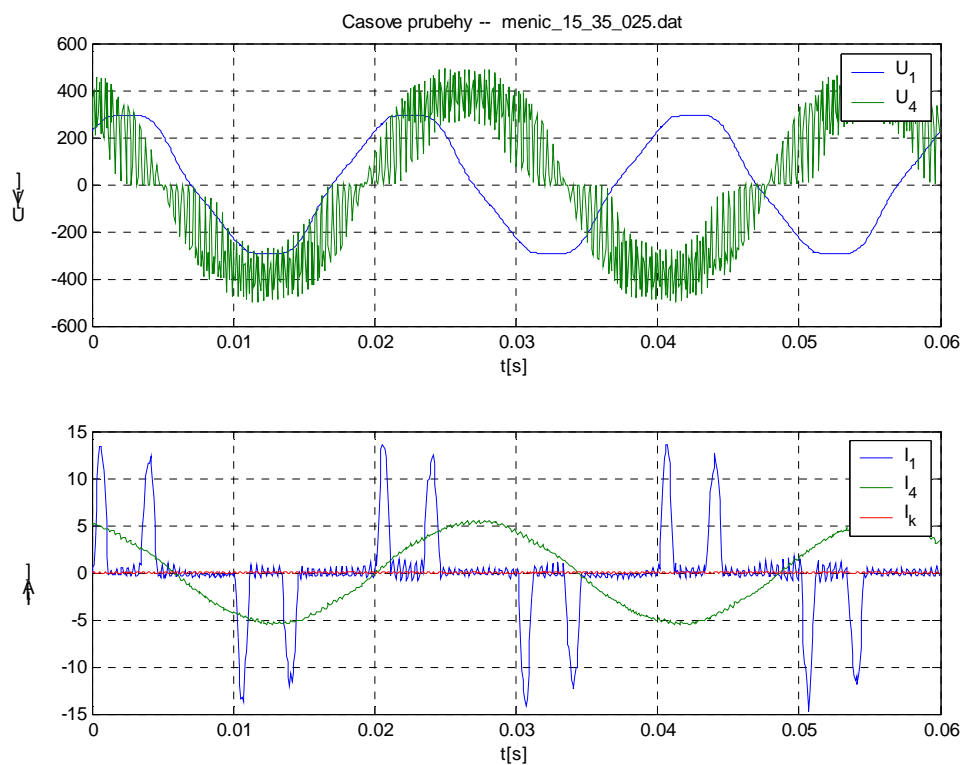
Graf č.32: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených bez vstupního filtru při nastavených parametrech - 15Nm; 20Hz a 2,5kHz



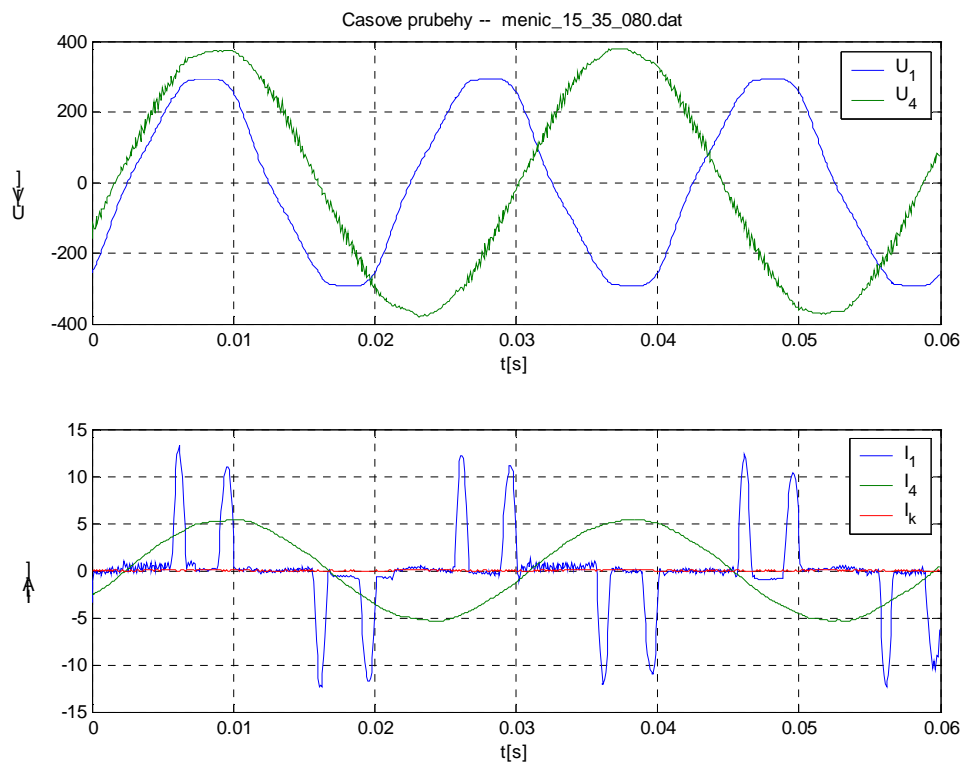
Graf č.33: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených bez vstupního filtru při nastavených parametrech - 15Nm; 20Hz a 8kHz



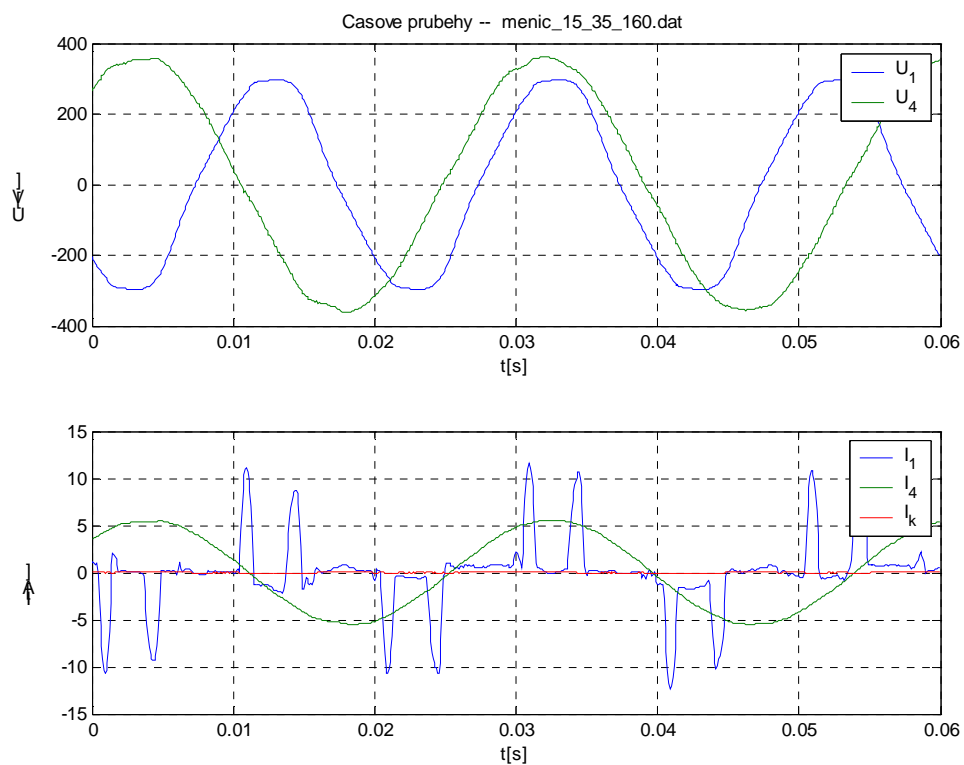
Graf č.34: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených bez vstupního filtru při nastavených parametrech - 15Nm; 20Hz a 16kHz



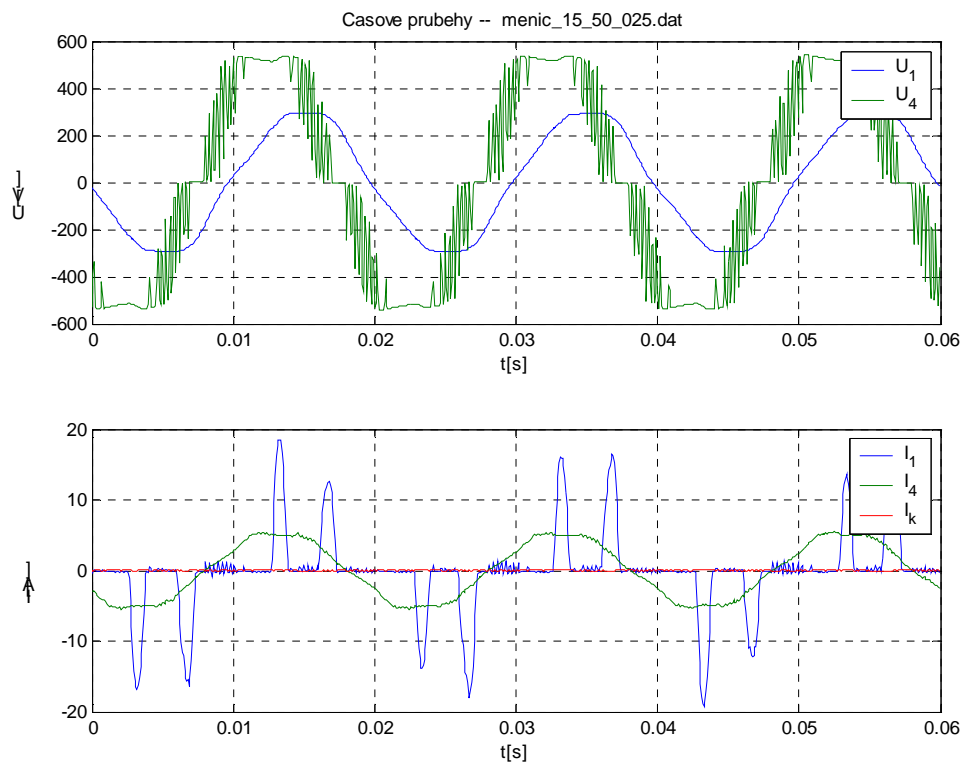
Graf č.35: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených bez vstupního filtru při nastavených parametrech - 15Nm; 35Hz a 2,5kHz



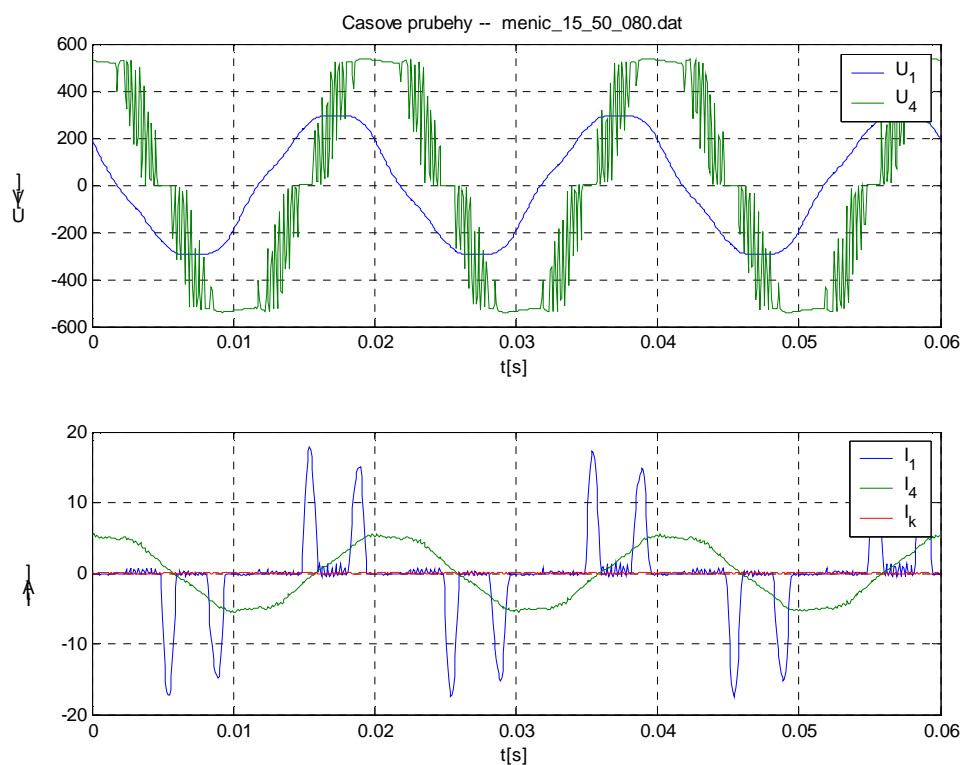
Graf č.36: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených bez vstupního filtru při nastavených parametrech - 15Nm; 35Hz a 8kHz



Graf č.37: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených bez vstupního filtru při nastavených parametrech - 15Nm; 35Hz a 16kHz

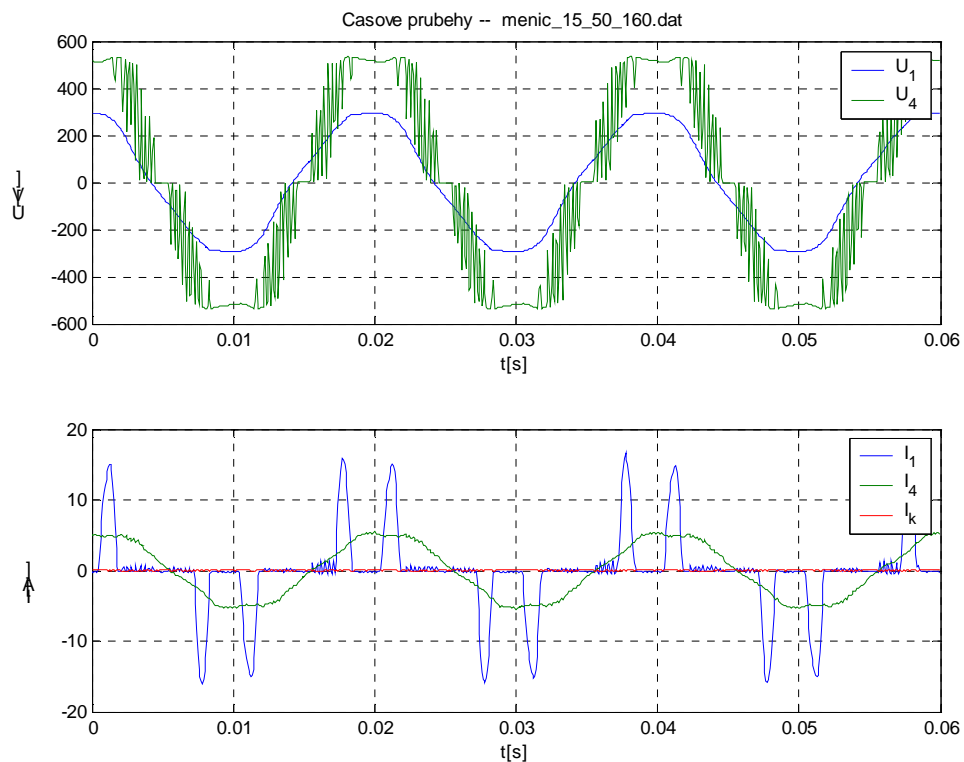


Graf č.38: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených bez vstupního filtru při nastavených parametrech - 15Nm; 50Hz a 2,5kHz

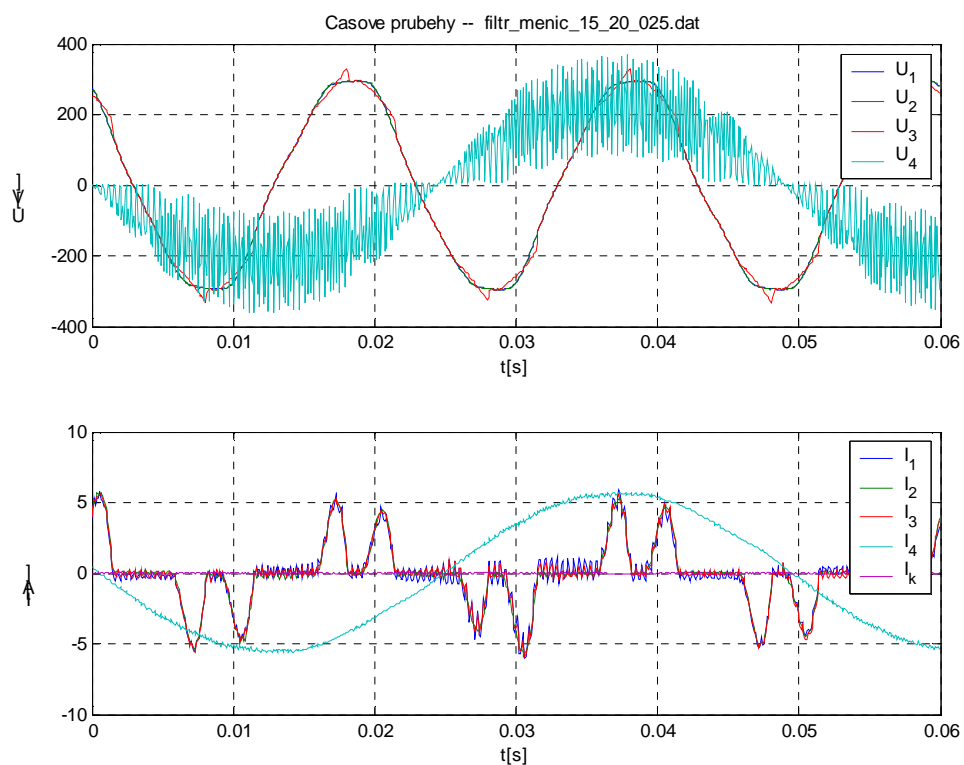


Graf č.39: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených bez vstupního filtru při nastavených parametrech - 15Nm; 50Hz a 8kHz

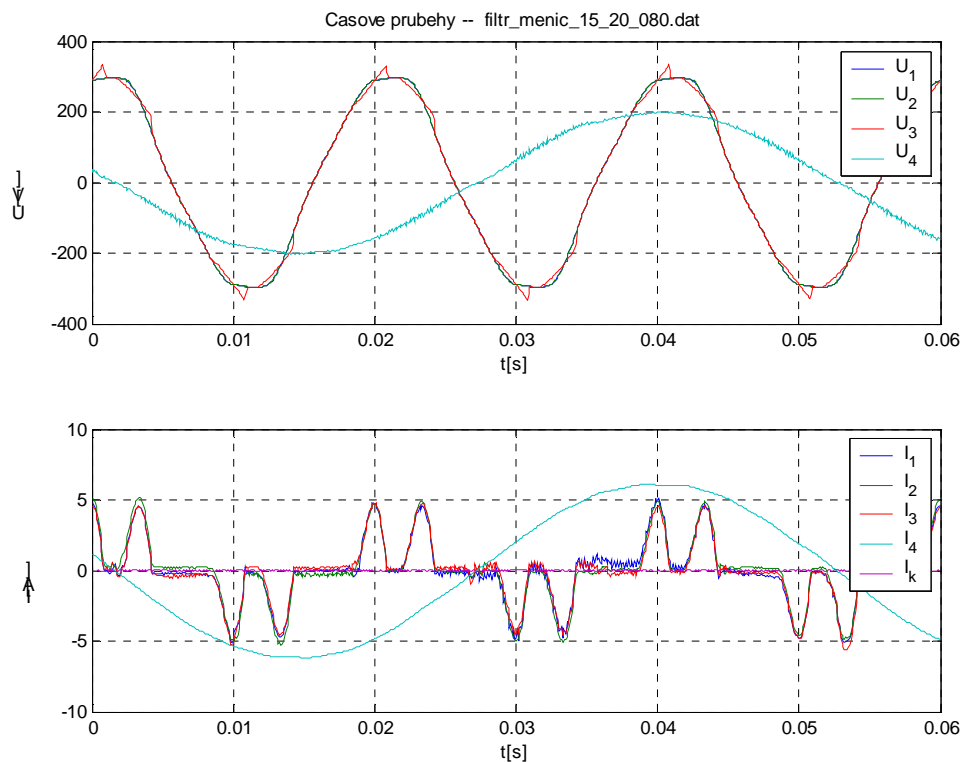




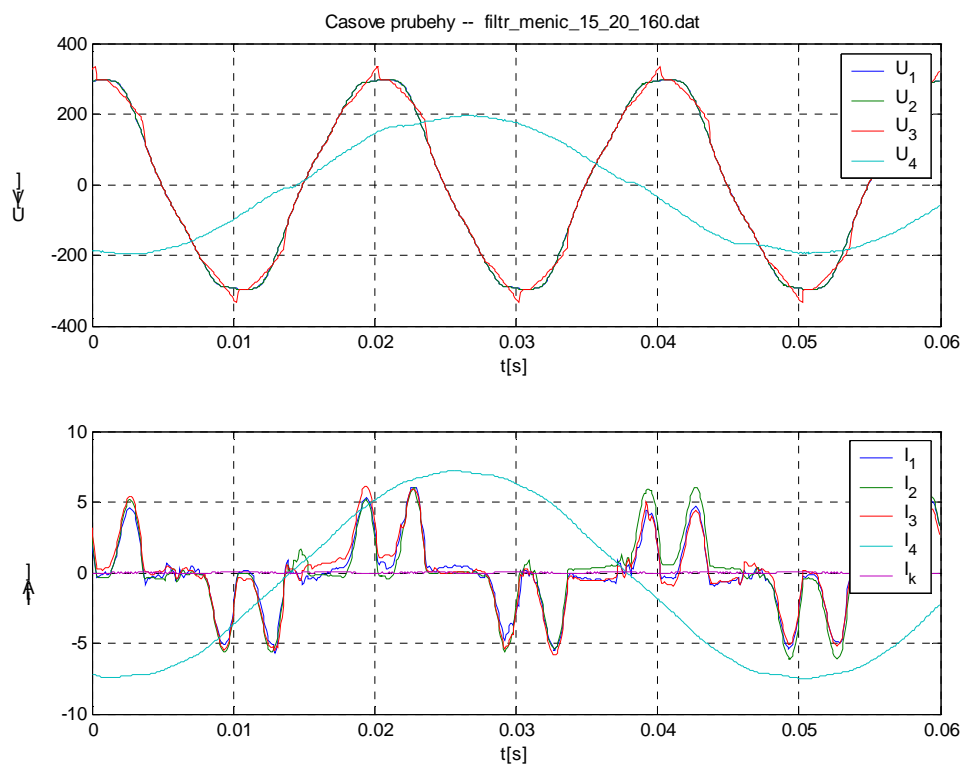
Graf č.40: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených bez vstupního filtru při nastavených parametrech - 15Nm; 50Hz a 16kHz



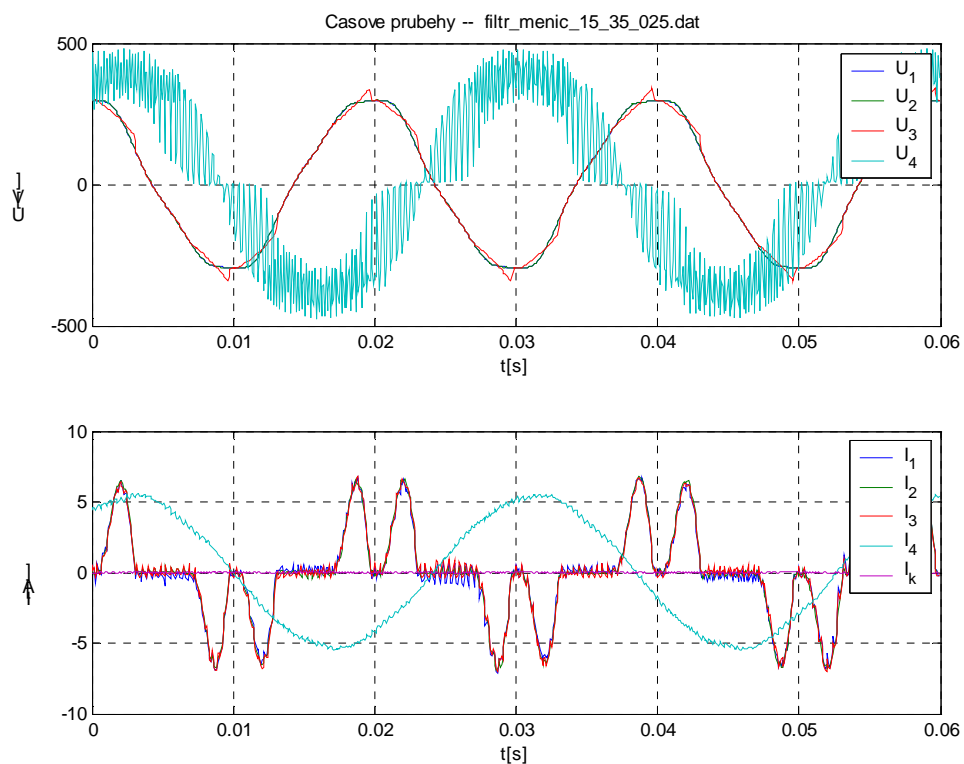
Graf č.41: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených se vstupním filtrem při nastavených parametrech - 15Nm; 20Hz a 2,5kHz



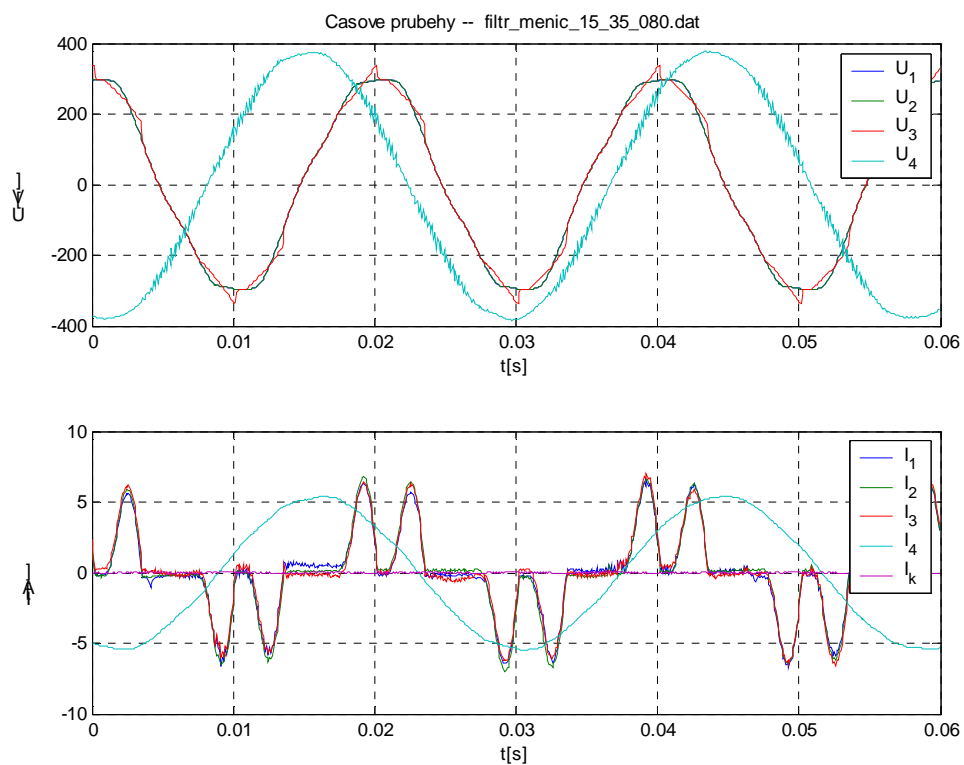
Graf č.42: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených se vstupním filtrem při nastavených parametrech - 15Nm; 20Hz a 8kHz



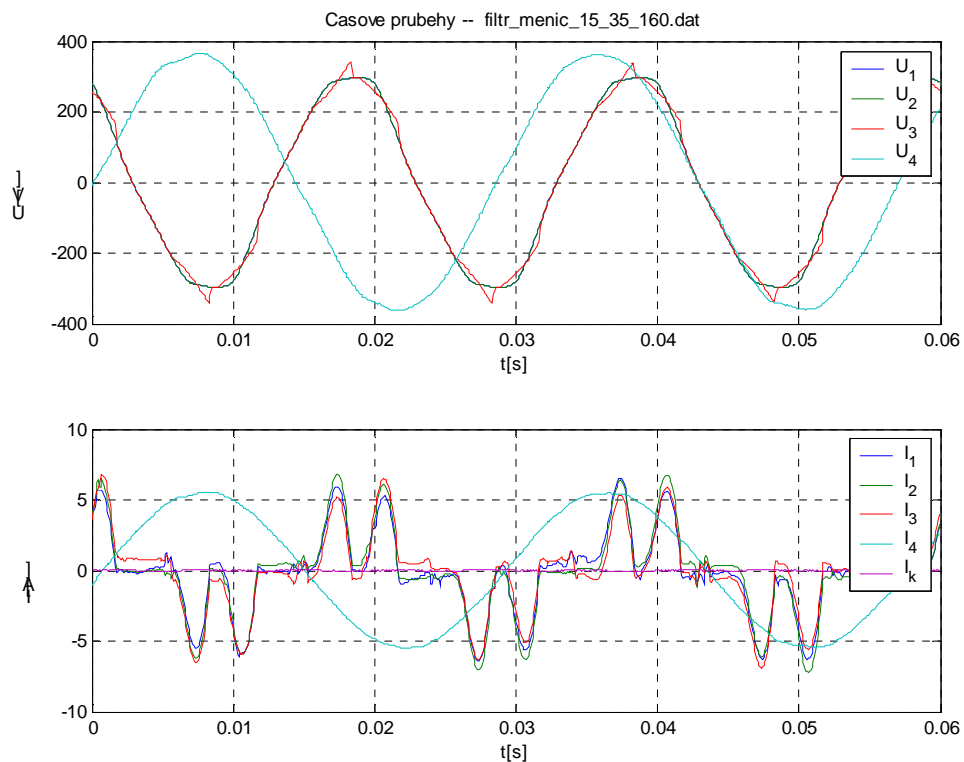
Graf č.43: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených se vstupním filtrem při nastavených parametrech - 15Nm; 20Hz a 16kHz



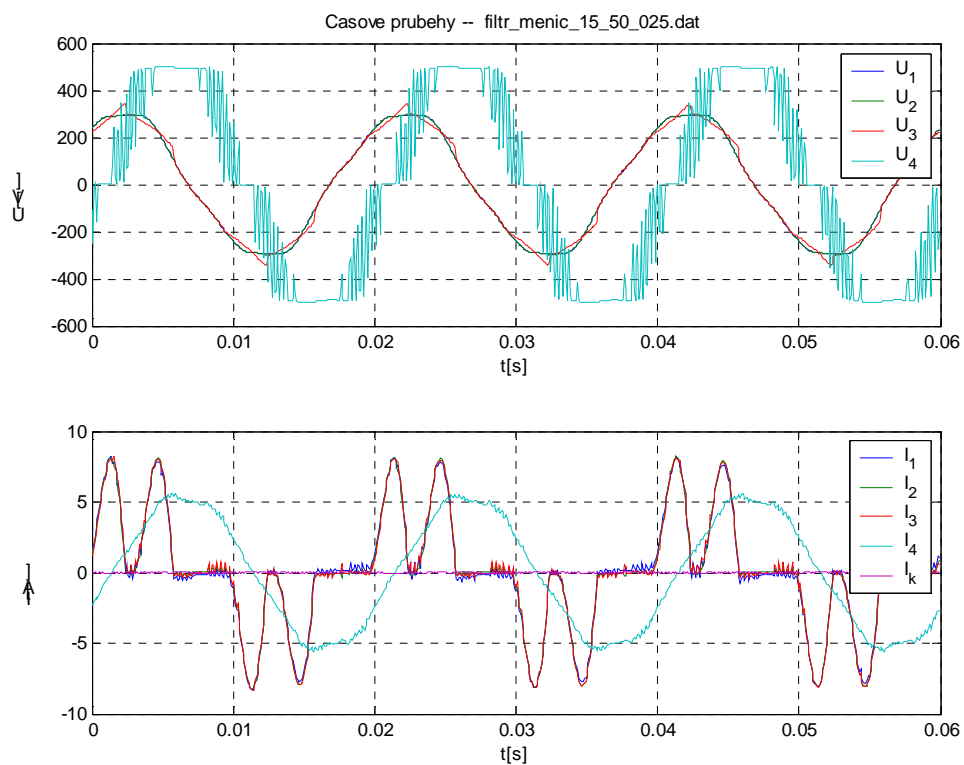
Graf č.44: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených se vstupním filtrem při nastavených parametrech - 15Nm; 35Hz a 2,5kHz



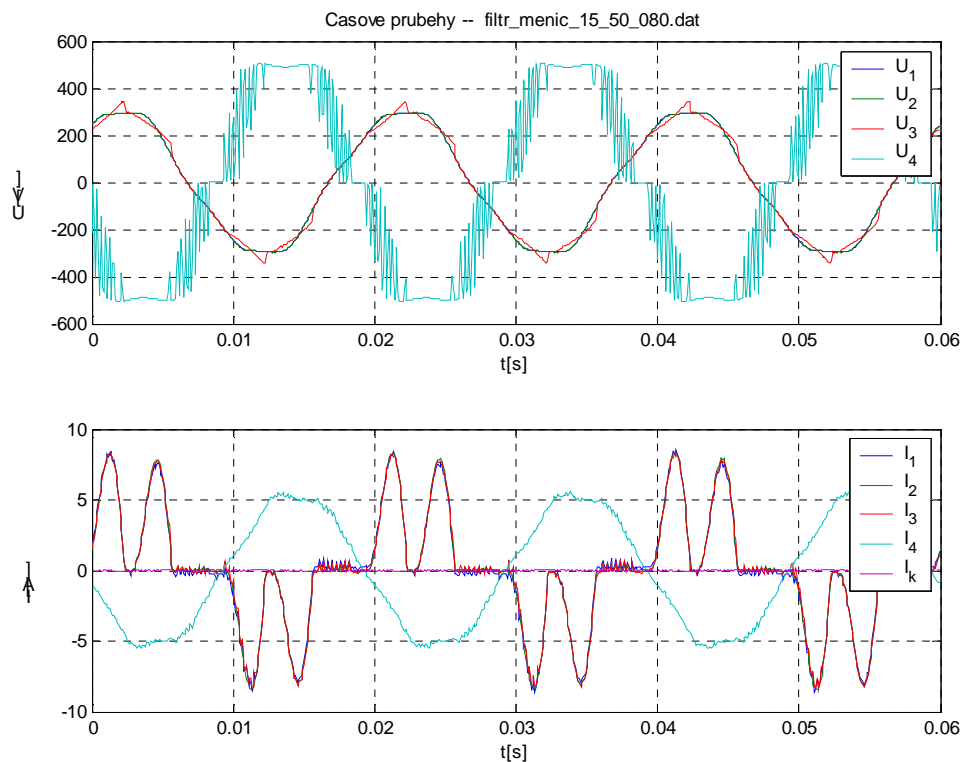
Graf č.45: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených se vstupním filtrem při nastavených parametrech - 15Nm; 35Hz a 8kHz



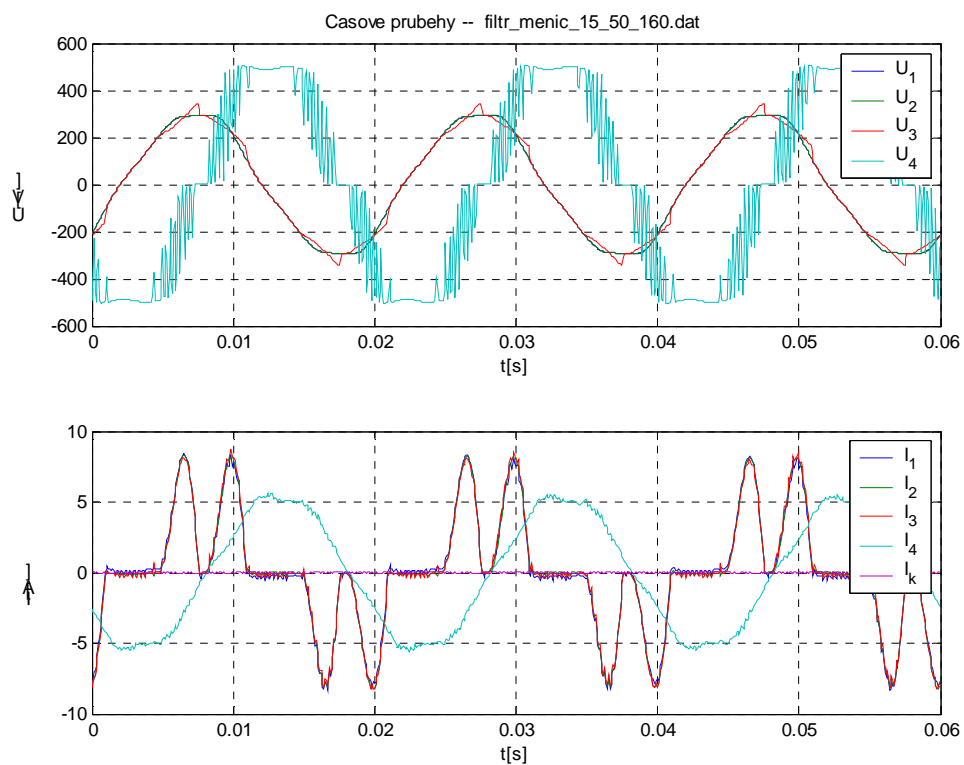
Graf č.46: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených se vstupním filtrem při nastavených parametrech - 15Nm; 35Hz a 16kHz



Graf č.47: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených se vstupním filtrem při nastavených parametrech - 15Nm; 50Hz a 2,5kHz



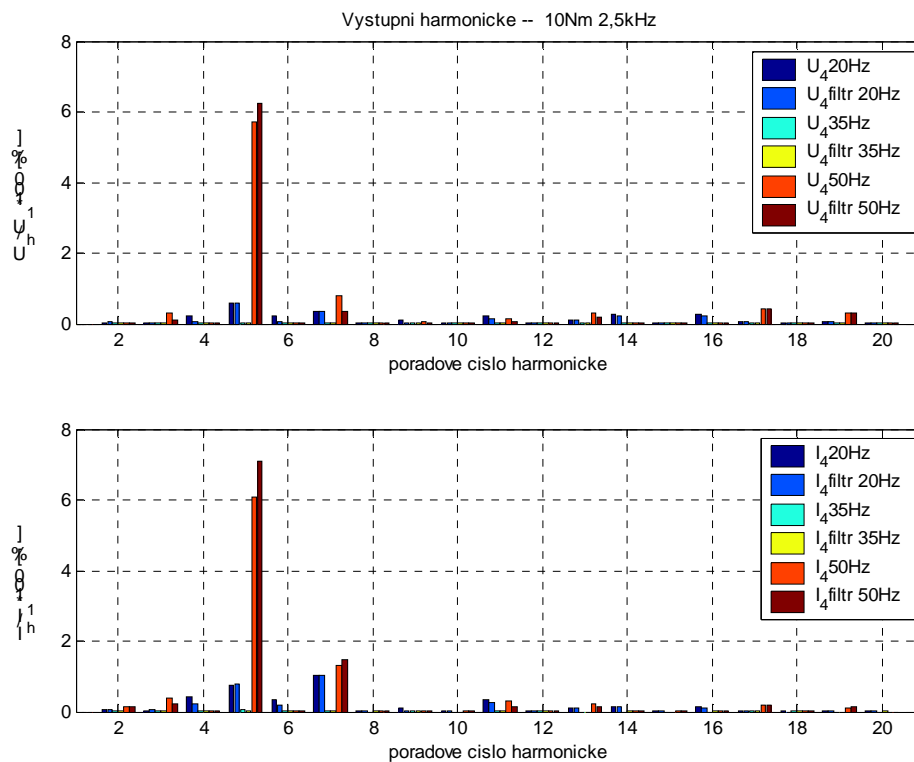
Graf č.48: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených se vstupním filtrem při nastavených parametrech - 15Nm; 50Hz a 8kHz



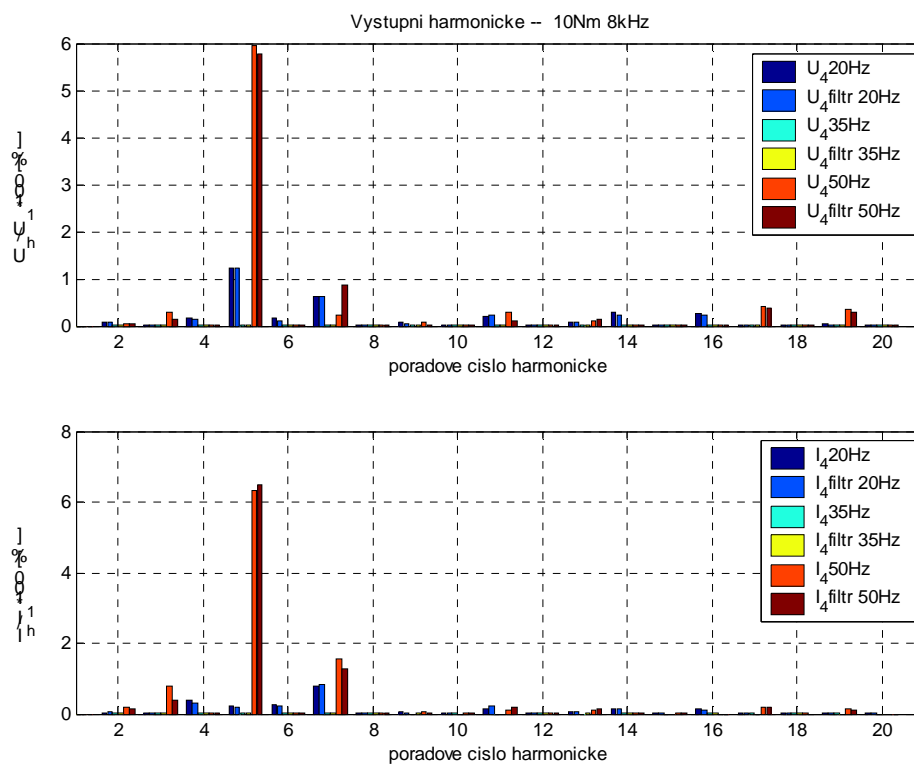
Graf č.49: Průběhy vstupních/výstupních napětí/proudů naměřených se vstupním filtrem při nastavených parametrech - 15Nm; 50Hz a 16kHz

## **Příloha II.**

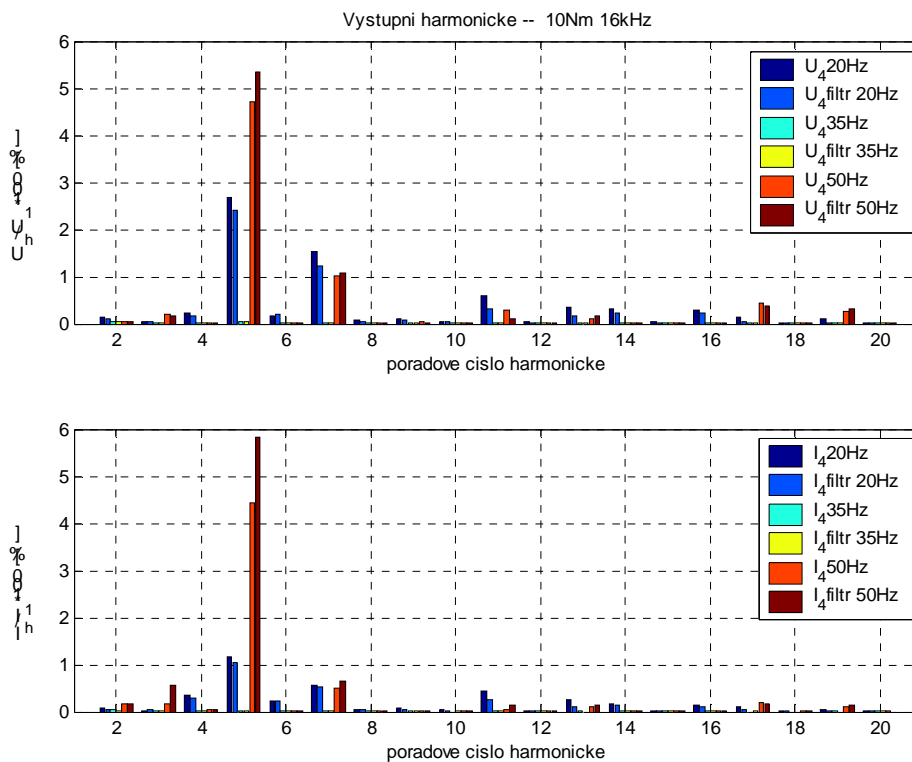
Grafy s porovnáním výstupních napěťových/proudových vyšších harmonických



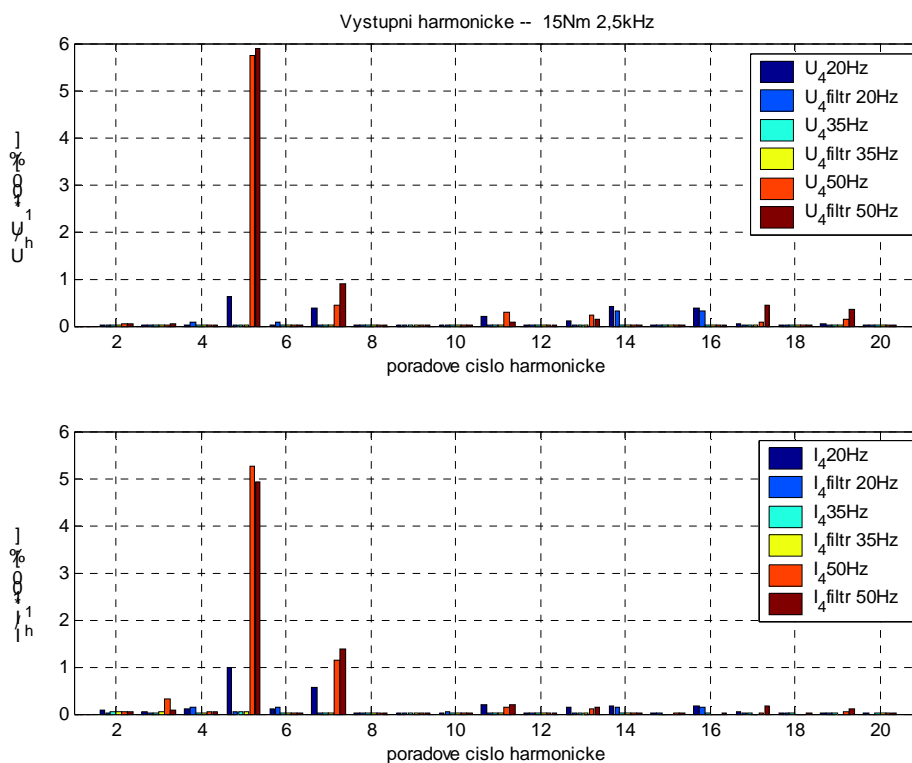
Graf č.50: Porovnání výstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 10Nm a modulační frekvenci 2,5kHz



Graf č.51: Porovnání výstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 10Nm a modulační frekvenci 8kHz

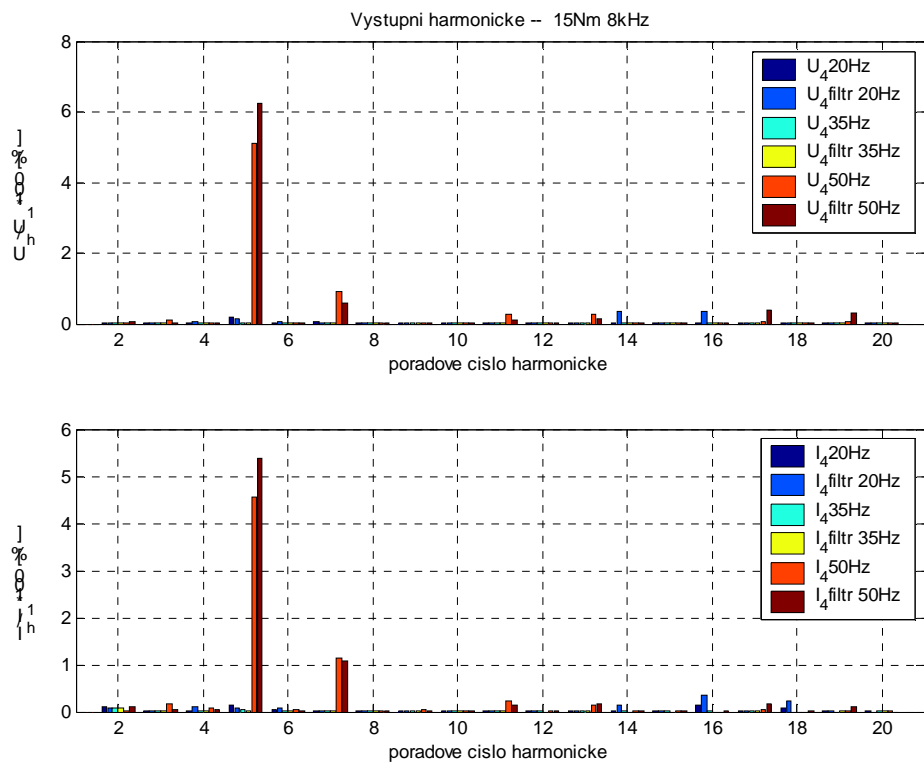


Graf č.52: Porovnání výstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 10Nm a modulační frekvenci 16kHz

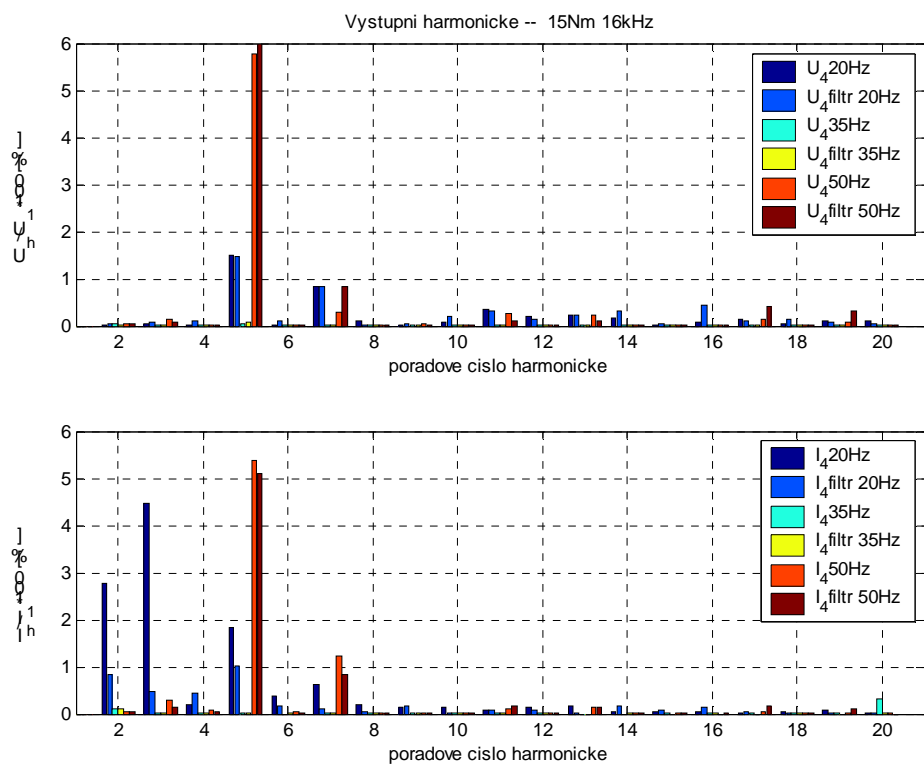


Graf č.53: Porovnání výstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 15Nm a modulační frekvenci 2,5kHz

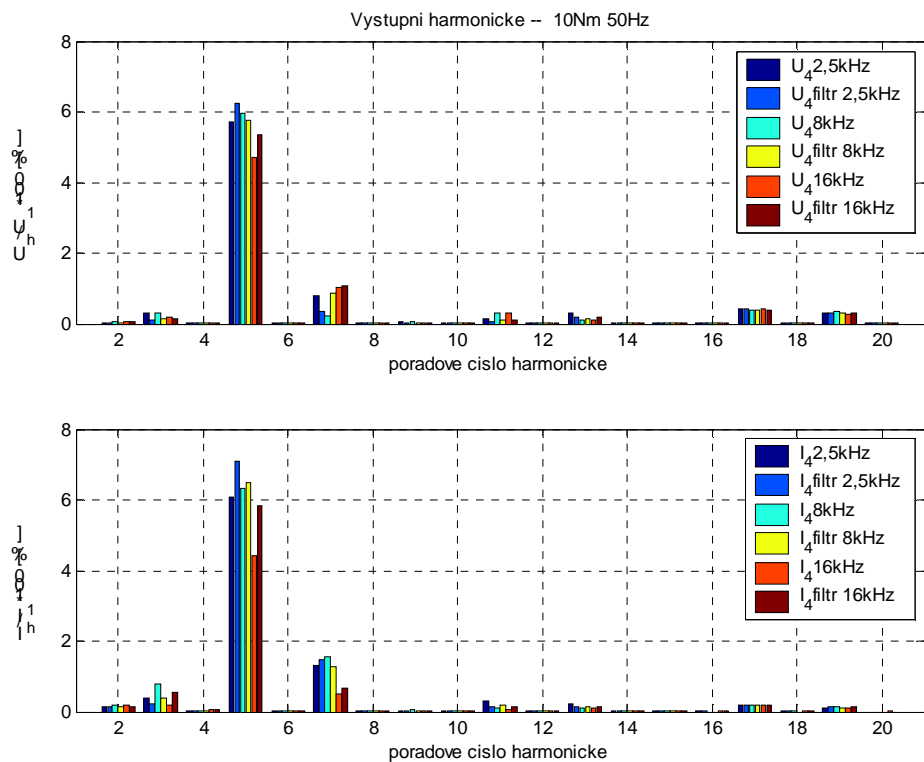




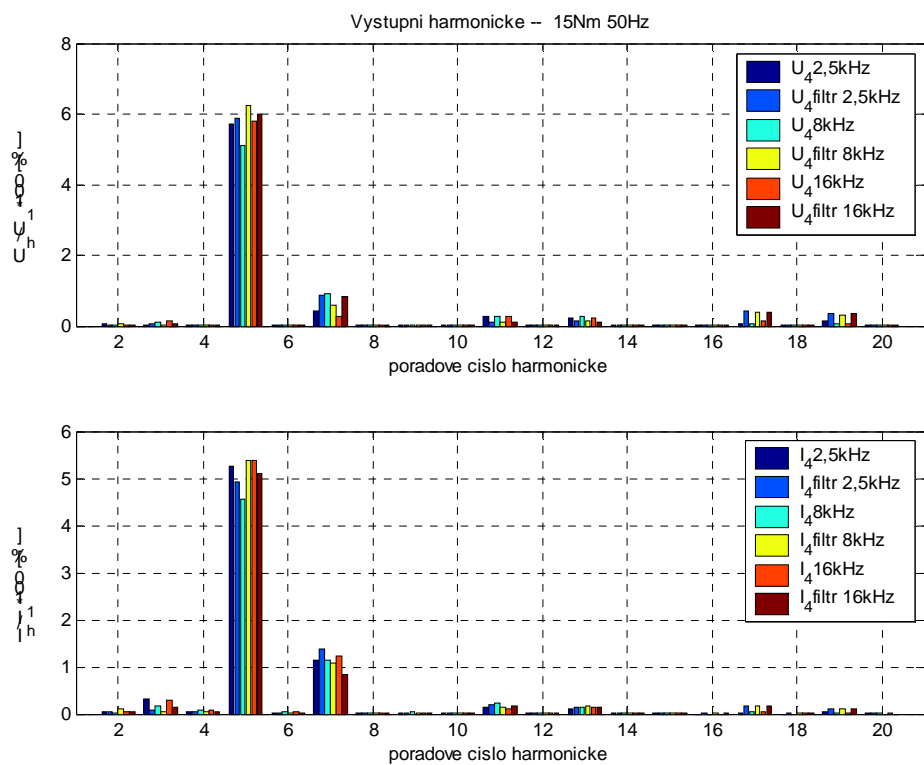
Graf č.54: Porovnání výstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 15Nm a modulační frekvenci 8kHz



Graf č.55: Porovnání výstupních harmonických napětí/proudu pro měřené frekvence při zatížení 15Nm a modulační frekvenci 16kHz



Graf č.56: Porovnání výstupních harmonických napětí/proudu pro měřené modulační frekvence při zatížení 10Nm a frekvenci 50Hz



Graf č.57: Porovnání výstupních harmonických napětí/proudu pro měřené modulační frekvence při zatížení 15Nm a frekvenci 50Hz

## **Příloha III.**

Tabulky hodnot vstupních/výstupních harmonických a vypočtených elektrických výkonových parametrů

(červené hodnoty označují překročení normy)

○ *Hodnoty vstupních/výstupních harmonických bez vstupního filtru*

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	
U1[V]	218,008	0,055	8,228	0,034	7,594	0,031	2,684	0,013	0,250	0,007	menic_10_20_025
U4[V]	155,065	0,051	0,031	0,345	0,891	0,325	0,536	0,008	0,164	0,018	
I1[A]	1,196	0,008	0,012	0,004	1,120	0,003	1,065	0,004	0,022	0,004	
I4[A]	2,957	0,002	0,001	0,012	0,023	0,010	0,031	0,000	0,003	0,000	
U1[V]	217,050	0,083	8,297	0,014	7,642	0,037	2,564	0,008	0,163	0,015	menic_10_20_080
U4[V]	147,008	0,093	0,034	0,260	1,792	0,248	0,905	0,022	0,119	0,026	
I1[A]	1,120	0,012	0,018	0,012	1,042	0,012	1,008	0,007	0,044	0,009	
I4[A]	2,948	0,001	0,001	0,011	0,007	0,008	0,023	0,001	0,002	0,001	
U1[V]	218,496	0,044	8,276	0,054	7,805	0,075	2,244	0,006	0,054	0,013	menic_10_20_160
U4[V]	134,236	0,174	0,059	0,316	3,620	0,225	2,039	0,083	0,129	0,042	
I1[A]	1,093	0,083	0,141	0,061	1,046	0,009	0,977	0,012	0,136	0,010	
I4[A]	3,114	0,002	0,001	0,011	0,037	0,007	0,018	0,002	0,002	0,001	
U1[V]	217,137	0,048	8,436	0,045	8,340	0,041	2,208	0,015	0,113	0,012	menic_10_35_025
U4[V]	242,622	0,037	0,010	0,005	0,022	0,003	0,004	0,002	0,003	0,001	
I1[A]	1,749	0,008	0,107	0,008	1,640	0,006	1,509	0,007	0,129	0,010	
I4[A]	2,713	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	217,844	0,035	8,160	0,069	8,257	0,069	2,699	0,021	0,140	0,020	menic_10_35_080
U4[V]	238,772	0,049	0,021	0,009	0,038	0,007	0,005	0,008	0,007	0,006	
I1[A]	1,655	0,031	0,032	0,021	1,537	0,019	1,424	0,013	0,075	0,014	
I4[A]	2,691	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	218,009	0,123	8,308	0,040	7,822	0,038	2,319	0,006	0,092	0,015	menic_10_35_160
U4[V]	224,136	0,101	0,013	0,007	0,100	0,009	0,018	0,010	0,008	0,009	
I1[A]	1,554	0,045	0,171	0,028	1,456	0,023	1,377	0,006	0,171	0,021	
I4[A]	2,594	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	217,352	0,021	8,330	0,039	8,352	0,038	2,435	0,015	0,111	0,010	menic_10_50_025
U4[V]	396,263	0,143	1,178	0,082	22,724	0,051	3,144	0,015	0,199	0,015	
I1[A]	2,351	0,085	0,134	0,058	2,165	0,008	1,932	0,008	0,183	0,013	
I4[A]	3,214	0,005	0,012	0,001	0,195	0,001	0,042	0,000	0,001	0,000	
U1[V]	218,381	0,046	8,484	0,049	7,632	0,020	2,155	0,014	0,050	0,011	menic_10_50_080
U4[V]	395,848	0,180	1,135	0,063	23,584	0,042	0,919	0,013	0,249	0,018	
I1[A]	2,339	0,087	0,159	0,059	2,140	0,009	1,877	0,018	0,226	0,013	
I4[A]	3,150	0,006	0,025	0,001	0,199	0,001	0,048	0,000	0,003	0,000	
U1[V]	217,448	0,087	7,990	0,058	8,961	0,032	2,394	0,018	0,158	0,005	menic_10_50_160
U4[V]	396,950	0,175	0,793	0,082	18,681	0,031	4,013	0,023	0,143	0,034	
I1[A]	2,313	0,070	0,118	0,053	2,112	0,011	1,881	0,008	0,182	0,014	
I4[A]	3,211	0,005	0,006	0,001	0,142	0,000	0,017	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	215,946	0,028	9,947	0,019	8,574	0,029	0,972	0,013	0,148	0,005	menic_15_20_025
U4[V]	153,728	0,041	0,022	0,042	0,934	0,040	0,573	0,013	0,034	0,014	
I1[A]	1,498	0,017	0,033	0,011	1,428	0,023	1,278	0,003	0,106	0,013	
I4[A]	4,014	0,003	0,002	0,005	0,039	0,004	0,022	0,001	0,001	0,000	
U1[V]	214,895	0,054	9,750	0,030	8,092	0,023	0,892	0,014	0,229	0,012	menic_15_20_080
U4[V]	126,845	0,019	0,023	0,015	0,239	0,003	0,077	0,008	0,005	0,009	
I1[A]	1,470	0,010	0,063	0,026	1,373	0,050	1,204	0,006	0,079	0,019	
I4[A]	3,759	0,004	0,000	0,001	0,005	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	
U1[V]	217,064	0,083	10,299	0,057	8,277	0,015	1,010	0,020	0,294	0,010	menic_15_20_160
U4[V]	88,109	0,026	0,032	0,015	1,334	0,018	0,744	0,086	0,023	0,079	
I1[A]	1,699	0,048	0,229	0,019	0,028	0,013	0,074	0,004	0,018	0,001	
I4[A]	4,796	0,134	0,215	0,009	0,089	0,018	0,030	0,009	0,007	0,007	
U1[V]	215,738	0,049	10,095	0,019	8,998	0,036	0,732	0,021	0,129	0,012	menic_15_35_025
U4[V]	236,796	0,058	0,035	0,031	0,045	0,020	0,021	0,013	0,009	0,008	
I1[A]	2,158	0,012	0,053	0,010	2,049	0,019	1,808	0,004	0,138	0,012	
I4[A]	3,253	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	
U1[V]	214,591	0,012	9,936	0,023	8,591	0,016	0,742	0,011	0,129	0,011	menic_15_35_080
U4[V]	227,134	0,048	0,011	0,013	0,050	0,002	0,011	0,002	0,012	0,007	
I1[A]	2,065	0,018	0,089	0,028	1,947	0,047	1,716	0,015	0,095	0,026	
I4[A]	3,243	0,003	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	215,431	0,077	9,913	0,012	7,402	0,017	1,591	0,017	0,309	0,005	menic_15_35_160
U4[V]	222,490	0,073	0,017	0,012	0,108	0,004	0,024	0,012	0,006	0,006	
I1[A]	1,915	0,031	0,105	0,046	1,804	0,088	1,607	0,029	0,081	0,033	
I4[A]	3,399	0,003	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	215,217	0,031	10,150	0,024	8,936	0,011	0,878	0,019	0,138	0,007	menic_15_50_025
U4[V]	389,709	0,161	0,090	0,077	22,337	0,047	1,687	0,011	0,075	0,007	
I1[A]	3,041	0,074	0,184	0,040	2,841	0,019	2,450	0,015	0,198	0,010	
I4[A]	3,760	0,002	0,012	0,002	0,198	0,001	0,043	0,000	0,000	0,001	
U1[V]	215,564	0,071	9,976	0,040	9,159	0,024	0,749	0,037	0,109	0,015	menic_15_50_080
U4[V]	391,365	0,126	0,374	0,098	19,962	0,042	3,519	0,017	0,121	0,012	
I1[A]	3,006	0,066	0,069	0,040	2,768	0,004	2,374	0,010	0,225	0,011	
I4[A]	3,757	0,001	0,006	0,003	0,172	0,001	0,043	0,000	0,001	0,000	
U1[V]	214,031	0,061	9,837	0,036	8,337	0,018	0,830	0,019	0,128	0,010	menic_15_50_160
U4[V]	387,956	0,155	0,471	0,049	22,433	0,048	1,093	0,021	0,120	0,018	
I1[A]	3,037	0,057	0,121	0,041	2,725	0,005	2,310	0,009	0,144	0,002	
I4[A]	3,729	0,002	0,011	0,003	0,201	0,001	0,046	0,000	0,001	0,000	

○ *Hodnoty vstupních/výstupních harmonických bez vstupního filtru*

	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	
U1[V]	0,651	0,005	0,502	0,005	0,233	0,001	0,278	0,003	0,282	0,004	menic_10_20_025
U4[V]	0,371	0,002	0,174	0,403	0,011	0,400	0,097	0,003	0,065	0,010	
I1[A]	0,888	0,001	0,792	0,006	0,067	0,004	0,577	0,002	0,470	0,003	
I4[A]	0,010	0,000	0,003	0,004	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,607	0,009	0,509	0,014	0,182	0,008	0,271	0,007	0,268	0,008	menic_10_20_080
U4[V]	0,269	0,019	0,102	0,408	0,011	0,391	0,020	0,008	0,054	0,005	
I1[A]	0,814	0,006	0,747	0,002	0,069	0,006	0,514	0,003	0,438	0,003	
I4[A]	0,005	0,000	0,002	0,005	0,000	0,004	0,000	0,000	0,001	0,000	
U1[V]	0,541	0,009	0,565	0,005	0,210	0,009	0,342	0,010	0,281	0,008	menic_10_20_160
U4[V]	0,807	0,068	0,469	0,422	0,053	0,394	0,193	0,023	0,143	0,032	
I1[A]	0,859	0,009	0,745	0,000	0,127	0,004	0,581	0,005	0,456	0,002	
I4[A]	0,014	0,000	0,008	0,005	0,001	0,004	0,003	0,000	0,002	0,000	
U1[V]	0,860	0,006	0,585	0,009	0,199	0,001	0,346	0,004	0,336	0,007	menic_10_35_025
U4[V]	0,003	0,003	0,002	0,008	0,001	0,010	0,001	0,005	0,003	0,001	
I1[A]	1,253	0,002	1,041	0,011	0,155	0,010	0,740	0,002	0,526	0,008	
I4[A]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,807	0,015	0,547	0,007	0,211	0,009	0,374	0,007	0,288	0,006	menic_10_35_080
U4[V]	0,002	0,005	0,004	0,017	0,004	0,013	0,006	0,006	0,004	0,003	
I1[A]	1,139	0,010	0,940	0,008	0,115	0,009	0,642	0,003	0,442	0,006	
I4[A]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,653	0,012	0,557	0,012	0,220	0,008	0,379	0,008	0,230	0,005	menic_10_35_160
U4[V]	0,005	0,013	0,008	0,003	0,003	0,018	0,002	0,008	0,014	0,003	
I1[A]	1,070	0,006	0,834	0,016	0,154	0,007	0,570	0,006	0,377	0,010	
I4[A]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	1,006	0,005	0,607	0,006	0,287	0,005	0,346	0,004	0,317	0,004	menic_10_50_025
U4[V]	0,487	0,016	1,141	0,010	0,037	0,011	1,664	0,006	1,170	0,004	
I1[A]	1,579	0,009	1,209	0,008	0,219	0,011	0,819	0,005	0,472	0,004	
I4[A]	0,009	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,004	0,000	
U1[V]	0,922	0,013	0,633	0,010	0,313	0,012	0,344	0,009	0,233	0,008	menic_10_50_080
U4[V]	1,175	0,008	0,411	0,010	0,107	0,014	1,596	0,002	1,345	0,005	
I1[A]	1,521	0,009	1,124	0,007	0,221	0,005	0,752	0,007	0,421	0,007	
I4[A]	0,004	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,005	0,000	
U1[V]	0,828	0,001	0,555	0,008	0,207	0,005	0,319	0,003	0,231	0,005	menic_10_50_160
U4[V]	1,177	0,006	0,389	0,003	0,034	0,015	1,690	0,008	1,033	0,004	
I1[A]	1,481	0,004	1,119	0,016	0,211	0,011	0,717	0,002	0,421	0,005	
I4[A]	0,001	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,003	0,000	
U1[V]	0,647	0,016	0,315	0,004	0,227	0,004	0,420	0,003	0,296	0,005	menic_15_20_025
U4[V]	0,292	0,005	0,177	0,609	0,014	0,606	0,086	0,001	0,056	0,007	
I1[A]	1,117	0,006	0,876	0,007	0,165	0,008	0,671	0,001	0,444	0,012	
I4[A]	0,008	0,000	0,005	0,007	0,000	0,007	0,002	0,001	0,001	0,001	
U1[V]	0,615	0,006	0,228	0,007	0,229	0,007	0,371	0,007	0,216	0,007	menic_15_20_080
U4[V]	0,010	0,011	0,016	0,001	0,011	0,005	0,008	0,007	0,001	0,006	
I1[A]	1,000	0,011	0,749	0,007	0,124	0,010	0,514	0,012	0,311	0,005	
I4[A]	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,005	0,000	0,003	0,000	0,000	
U1[V]	0,847	0,007	0,267	0,011	0,309	0,002	0,405	0,007	0,217	0,009	menic_15_20_160
U4[V]	0,318	0,170	0,197	0,145	0,017	0,069	0,120	0,040	0,083	0,099	
I1[A]	0,014	0,003	0,003	0,003	0,003	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	
I4[A]	0,003	0,007	0,008	0,003	0,002	0,003	0,001	0,002	0,003	0,001	
U1[V]	0,701	0,010	0,368	0,013	0,220	0,005	0,368	0,007	0,318	0,004	menic_15_35_025
U4[V]	0,003	0,001	0,007	0,005	0,007	0,017	0,005	0,003	0,004	0,005	
I1[A]	1,559	0,006	1,192	0,006	0,209	0,009	0,896	0,003	0,551	0,011	
I4[A]	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,751	0,007	0,326	0,003	0,220	0,004	0,401	0,002	0,328	0,003	menic_15_35_080
U4[V]	0,004	0,006	0,004	0,006	0,005	0,003	0,000	0,003	0,004	0,001	
I1[A]	1,474	0,010	1,151	0,016	0,176	0,009	0,834	0,004	0,516	0,009	
I4[A]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,617	0,011	0,468	0,004	0,290	0,008	0,400	0,003	0,264	0,003	menic_15_35_160
U4[V]	0,006	0,007	0,007	0,006	0,003	0,019	0,009	0,010	0,011	0,023	
I1[A]	1,317	0,016	1,005	0,009	0,152	0,004	0,686	0,004	0,394	0,012	
I4[A]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	
U1[V]	1,082	0,009	0,423	0,004	0,321	0,004	0,473	0,002	0,283	0,004	menic_15_50_025
U4[V]	1,090	0,010	0,839	0,007	0,075	0,001	0,264	0,005	0,546	0,008	
I1[A]	2,008	0,005	1,431	0,004	0,285	0,009	0,979	0,006	0,476	0,012	
I4[A]	0,005	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,000	
U1[V]	1,007	0,011	0,366	0,014	0,275	0,006	0,435	0,006	0,259	0,007	menic_15_50_080
U4[V]	0,955	0,010	1,034	0,004	0,102	0,007	0,315	0,003	0,299	0,002	
I1[A]	1,941	0,008	1,362	0,010	0,296	0,007	0,917	0,004	0,453	0,009	
I4[A]	0,008	0,000	0,005	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	
U1[V]	0,961	0,008	0,316	0,004	0,240	0,001	0,334	0,006	0,191	0,005	menic_15_50_160
U4[V]	1,002	0,006	0,837	0,007	0,115	0,005	0,518	0,002	0,292	0,005	
I1[A]	1,714	0,008	1,175	0,009	0,206	0,005	0,669	0,003	0,302	0,002	
I4[A]	0,004	0,000	0,005	0,000	0,001	0,000	0,002	0,000	0,001	0,000	

○ *Hodnoty vstupních/výstupních harmonických se vstupním filtrem (10Nm)*

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	
U1[V]	216,716	0,211	8,517	0,083	7,346	0,020	2,061	0,035	0,105	0,031	filtr_menic_10_20_025
U2[V]	216,920	0,211	8,536	0,083	7,326	0,019	2,062	0,035	0,103	0,030	
U3[V]	216,369	0,214	8,458	0,081	4,847	0,036	5,237	0,019	0,101	0,038	
U4[V]	155,161	0,069	0,023	0,120	0,889	0,110	0,525	0,012	0,036	0,025	
I1[A]	0,993	0,008	0,061	0,001	0,743	0,006	0,568	0,003	0,006	0,003	
I2[A]	1,036	0,015	0,071	0,006	0,781	0,004	0,578	0,004	0,008	0,003	
I3[A]	1,029	0,012	0,070	0,006	0,777	0,005	0,565	0,004	0,008	0,002	
I4[A]	2,968	0,002	0,002	0,007	0,024	0,005	0,031	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	217,575	0,188	8,067	0,054	8,051	0,071	1,611	0,035	0,145	0,029	filtr_menic_10_20_080
U2[V]	217,788	0,188	8,083	0,052	8,032	0,069	1,604	0,035	0,153	0,029	
U3[V]	217,186	0,183	7,961	0,049	5,837	0,079	5,098	0,043	0,281	0,050	
U4[V]	147,352	0,102	0,038	0,196	1,819	0,139	0,926	0,021	0,060	0,020	
I1[A]	1,023	0,012	0,107	0,005	0,767	0,007	0,601	0,002	0,016	0,002	
I2[A]	1,071	0,045	0,117	0,009	0,802	0,006	0,611	0,003	0,019	0,000	
I3[A]	1,067	0,030	0,116	0,009	0,801	0,004	0,600	0,006	0,019	0,003	
I4[A]	2,961	0,001	0,001	0,009	0,006	0,006	0,024	0,001	0,001	0,000	
U1[V]	218,549	0,079	8,204	0,010	8,002	0,044	1,820	0,001	0,111	0,016	filtr_menic_10_20_160
U2[V]	218,763	0,087	8,220	0,012	7,985	0,044	1,826	0,014	0,125	0,004	
U3[V]	218,197	0,092	8,250	0,012	5,318	0,055	5,585	0,009	0,368	0,012	
U4[V]	135,226	0,154	0,051	0,221	3,264	0,259	1,679	0,069	0,108	0,041	
I1[A]	1,028	0,054	0,023	0,017	0,750	0,024	0,602	0,003	0,026	0,002	
I2[A]	1,082	0,092	0,040	0,012	0,784	0,014	0,612	0,005	0,024	0,004	
I3[A]	1,088	0,091	0,035	0,017	0,795	0,022	0,607	0,010	0,023	0,004	
I4[A]	3,089	0,002	0,001	0,009	0,032	0,007	0,016	0,001	0,002	0,000	
U1[V]	216,879	0,097	8,136	0,043	7,602	0,046	1,839	0,007	0,108	0,021	filtr_menic_10_35_025
U2[V]	217,073	0,096	8,154	0,043	7,567	0,045	1,834	0,008	0,105	0,021	
U3[V]	216,305	0,097	8,070	0,019	4,317	0,052	6,652	0,020	0,259	0,019	
U4[V]	249,231	0,040	0,037	0,035	0,034	0,027	0,028	0,024	0,023	0,018	
I1[A]	1,590	0,006	0,037	0,009	1,120	0,008	0,790	0,001	0,018	0,002	
I2[A]	1,642	0,009	0,050	0,009	1,164	0,006	0,803	0,002	0,015	0,002	
I3[A]	1,634	0,007	0,047	0,010	1,163	0,006	0,789	0,002	0,016	0,002	
I4[A]	2,796	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	217,339	0,140	8,132	0,066	8,907	0,047	1,230	0,023	0,263	0,017	filtr_menic_10_35_080
U2[V]	217,542	0,140	8,151	0,066	8,874	0,044	1,217	0,022	0,275	0,017	
U3[V]	216,778	0,144	8,150	0,069	5,671	0,008	6,968	0,041	0,424	0,014	
U4[V]	235,681	0,051	0,013	0,002	0,054	0,004	0,013	0,003	0,007	0,008	
I1[A]	1,572	0,008	0,017	0,008	1,122	0,010	0,842	0,005	0,021	0,002	
I2[A]	1,621	0,012	0,030	0,011	1,163	0,008	0,846	0,006	0,017	0,001	
I3[A]	1,621	0,006	0,027	0,014	1,166	0,010	0,839	0,006	0,017	0,002	
I4[A]	2,669	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	218,197	0,164	8,119	0,117	8,151	0,037	1,794	0,036	0,114	0,029	filtr_menic_10_35_160
U2[V]	218,406	0,165	8,139	0,118	8,116	0,037	1,787	0,036	0,123	0,028	
U3[V]	217,616	0,166	8,163	0,098	4,434	0,059	7,191	0,063	0,379	0,042	
U4[V]	220,645	0,084	0,012	0,005	0,094	0,006	0,025	0,009	0,015	0,016	
I1[A]	1,511	0,012	0,023	0,004	1,055	0,025	0,757	0,004	0,026	0,001	
I2[A]	1,573	0,029	0,039	0,006	1,097	0,022	0,735	0,009	0,022	0,006	
I3[A]	1,571	0,015	0,034	0,015	1,106	0,020	0,735	0,008	0,025	0,006	
I4[A]	2,560	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	216,816	0,174	8,380	0,088	7,237	0,087	1,914	0,061	0,126	0,036	filtr_menic_10_50_025
U2[V]	216,993	0,175	8,396	0,090	7,192	0,086	1,898	0,059	0,128	0,038	
U3[V]	215,995	0,171	8,305	0,132	4,197	0,060	7,620	0,064	0,401	0,058	
U4[V]	377,299	0,147	0,388	0,066	23,586	0,023	1,241	0,028	0,037	0,016	
I1[A]	2,179	0,072	0,038	0,062	1,484	0,010	0,969	0,009	0,028	0,007	
I2[A]	2,222	0,049	0,082	0,047	1,525	0,022	0,986	0,006	0,024	0,006	
I3[A]	2,218	0,049	0,080	0,047	1,536	0,017	0,964	0,007	0,025	0,007	
I4[A]	3,045	0,004	0,007	0,001	0,216	0,001	0,045	0,000	0,001	0,000	
U1[V]	217,327	0,148	7,790	0,104	8,650	0,049	1,769	0,018	0,156	0,013	filtr_menic_10_50_080
U2[V]	217,510	0,149	7,806	0,105	8,603	0,048	1,760	0,018	0,167	0,012	
U3[V]	216,490	0,148	7,784	0,095	4,360	0,088	8,616	0,017	0,376	0,009	
U4[V]	377,530	0,148	0,505	0,057	21,748	0,047	3,214	0,014	0,040	0,024	
I1[A]	2,221	0,076	0,054	0,068	1,534	0,007	1,071	0,003	0,034	0,005	
I2[A]	2,277	0,052	0,091	0,048	1,598	0,018	1,090	0,002	0,031	0,004	
I3[A]	2,258	0,051	0,090	0,049	1,590	0,012	1,072	0,002	0,032	0,005	
I4[A]	3,035	0,004	0,012	0,001	0,196	0,001	0,039	0,000	0,001	0,000	
U1[V]	217,402	0,221	8,078	0,122	8,471	0,032	1,370	0,034	0,230	0,026	filtr_menic_10_50_160
U2[V]	217,606	0,222	8,099	0,123	8,425	0,030	1,350	0,034	0,241	0,027	
U3[V]	216,607	0,209	8,168	0,132	4,511	0,089	8,049	0,021	0,553	0,025	
U4[V]	377,754	0,175	0,607	0,053	20,225	0,038	4,116	0,024	0,057	0,013	
I1[A]	2,261	0,082	0,021	0,060	1,487	0,014	1,037	0,008	0,040	0,004	
I2[A]	2,346	0,063	0,039	0,052	1,540	0,029	1,056	0,007	0,036	0,004	
I3[A]	2,320	0,063	0,024	0,048	1,539	0,020	1,034	0,006	0,038	0,005	
I4[A]	3,032	0,005	0,017	0,001	0,177	0,001	0,020	0,000	0,001	0,000	

○ *Hodnoty vstupních/výstupních harmonických se vstupním filtrem (10Nm)*

	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	
U1[V]	0,220	0,020	0,404	0,021	0,018	0,017	0,031	0,015	0,035	0,013	filtr_menic_10_20_025
U2[V]	0,211	0,019	0,396	0,022	0,020	0,018	0,030	0,015	0,036	0,014	
U3[V]	2,681	0,043	1,190	0,018	0,228	0,033	0,674	0,019	0,456	0,018	
U4[V]	0,238	0,007	0,167	0,319	0,016	0,322	0,093	0,003	0,070	0,011	
I1[A]	0,223	0,005	0,101	0,000	0,012	0,001	0,034	0,001	0,019	0,001	
I2[A]	0,227	0,005	0,106	0,001	0,012	0,001	0,035	0,001	0,019	0,001	
I3[A]	0,229	0,004	0,103	0,001	0,012	0,002	0,035	0,001	0,018	0,001	
I4[A]	0,007	0,000	0,003	0,004	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,136	0,025	0,523	0,015	0,069	0,015	0,074	0,013	0,067	0,013	filtr_menic_10_20_080
U2[V]	0,125	0,024	0,513	0,015	0,072	0,014	0,078	0,013	0,072	0,013	
U3[V]	2,996	0,023	1,355	0,019	0,211	0,011	0,939	0,024	0,708	0,020	
U4[V]	0,324	0,019	0,119	0,317	0,019	0,322	0,019	0,010	0,018	0,014	
I1[A]	0,236	0,008	0,112	0,002	0,015	0,001	0,042	0,003	0,027	0,001	
I2[A]	0,239	0,008	0,119	0,001	0,016	0,002	0,043	0,004	0,027	0,002	
I3[A]	0,239	0,005	0,114	0,004	0,016	0,001	0,043	0,002	0,025	0,001	
I4[A]	0,007	0,000	0,002	0,004	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,182	0,014	0,523	0,004	0,069	0,002	0,067	0,001	0,085	0,001	filtr_menic_10_20_160
U2[V]	0,183	0,022	0,501	0,010	0,079	0,014	0,057	0,014	0,093	0,014	
U3[V]	2,950	0,015	1,578	0,010	0,034	0,010	0,919	0,005	0,883	0,011	
U4[V]	0,421	0,036	0,238	0,318	0,027	0,301	0,066	0,005	0,026	0,015	
I1[A]	0,216	0,012	0,115	0,005	0,006	0,003	0,042	0,003	0,032	0,003	
I2[A]	0,223	0,008	0,121	0,007	0,013	0,004	0,043	0,001	0,032	0,001	
I3[A]	0,222	0,001	0,118	0,009	0,008	0,005	0,042	0,003	0,030	0,003	
I4[A]	0,008	0,000	0,004	0,004	0,001	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,311	0,008	0,397	0,004	0,037	0,006	0,063	0,001	0,041	0,002	filtr_menic_10_35_025
U2[V]	0,294	0,010	0,390	0,003	0,042	0,006	0,064	0,001	0,044	0,001	
U3[V]	2,725	0,041	1,231	0,027	0,174	0,023	0,871	0,027	0,496	0,016	
U4[V]	0,018	0,017	0,017	0,020	0,014	0,010	0,014	0,015	0,010	0,013	
I1[A]	0,241	0,004	0,094	0,002	0,011	0,001	0,043	0,002	0,021	0,001	
I2[A]	0,247	0,003	0,099	0,002	0,012	0,001	0,044	0,002	0,020	0,001	
I3[A]	0,249	0,003	0,095	0,002	0,012	0,001	0,044	0,002	0,020	0,001	
I4[A]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,291	0,016	0,549	0,013	0,053	0,013	0,107	0,009	0,076	0,009	filtr_menic_10_35_080
U2[V]	0,271	0,016	0,544	0,013	0,058	0,014	0,113	0,009	0,085	0,009	
U3[V]	3,224	0,047	1,698	0,009	0,167	0,024	1,412	0,027	1,086	0,012	
U4[V]	0,005	0,004	0,005	0,006	0,003	0,002	0,004	0,006	0,008	0,007	
I1[A]	0,268	0,007	0,119	0,003	0,007	0,000	0,066	0,004	0,044	0,000	
I2[A]	0,273	0,007	0,123	0,004	0,009	0,002	0,065	0,004	0,042	0,001	
I3[A]	0,275	0,004	0,120	0,003	0,009	0,001	0,065	0,002	0,040	0,002	
I4[A]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,306	0,016	0,505	0,017	0,031	0,012	0,077	0,011	0,077	0,011	filtr_menic_10_35_160
U2[V]	0,289	0,017	0,500	0,017	0,035	0,013	0,079	0,011	0,085	0,011	
U3[V]	2,953	0,034	1,658	0,020	0,096	0,012	1,206	0,017	0,981	0,005	
U4[V]	0,006	0,002	0,004	0,004	0,007	0,014	0,005	0,004	0,007	0,010	
I1[A]	0,234	0,010	0,102	0,028	0,005	0,001	0,055	0,005	0,036	0,006	
I2[A]	0,239	0,003	0,111	0,021	0,008	0,002	0,054	0,003	0,035	0,005	
I3[A]	0,241	0,003	0,104	0,021	0,009	0,002	0,055	0,006	0,034	0,003	
I4[A]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,317	0,032	0,430	0,023	0,072	0,021	0,060	0,018	0,020	0,016	filtr_menic_10_50_025
U2[V]	0,302	0,031	0,429	0,022	0,076	0,024	0,064	0,017	0,024	0,016	
U3[V]	2,659	0,016	1,501	0,018	0,160	0,022	1,101	0,007	0,555	0,013	
U4[V]	0,296	0,015	0,647	0,006	0,003	0,016	1,557	0,011	1,158	0,009	
I1[A]	0,240	0,003	0,099	0,006	0,008	0,002	0,054	0,001	0,025	0,003	
I2[A]	0,246	0,003	0,101	0,004	0,009	0,002	0,054	0,002	0,025	0,002	
I3[A]	0,248	0,003	0,099	0,004	0,009	0,002	0,054	0,001	0,025	0,002	
I4[A]	0,005	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,004	0,000	
U1[V]	0,329	0,018	0,535	0,012	0,041	0,012	0,072	0,009	0,072	0,009	filtr_menic_10_50_080
U2[V]	0,311	0,019	0,537	0,012	0,047	0,012	0,081	0,010	0,078	0,009	
U3[V]	3,116	0,012	2,084	0,026	0,199	0,026	1,797	0,033	1,125	0,009	
U4[V]	0,425	0,005	0,517	0,003	0,003	0,013	1,465	0,003	1,128	0,005	
I1[A]	0,278	0,003	0,129	0,004	0,014	0,001	0,089	0,001	0,051	0,003	
I2[A]	0,285	0,003	0,131	0,005	0,016	0,002	0,091	0,002	0,051	0,002	
I3[A]	0,287	0,003	0,125	0,004	0,016	0,002	0,091	0,001	0,050	0,002	
I4[A]	0,006	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,004	0,000	
U1[V]	0,265	0,010	0,529	0,023	0,056	0,015	0,031	0,014	0,057	0,012	filtr_menic_10_50_160
U2[V]	0,250	0,010	0,532	0,023	0,059	0,016	0,036	0,014	0,061	0,012	
U3[V]	2,679	0,032	1,861	0,040	0,095	0,029	1,199	0,009	0,753	0,006	
U4[V]	0,409	0,015	0,638	0,005	0,007	0,016	1,452	0,006	1,177	0,005	
I1[A]	0,240	0,001	0,107	0,005	0,004	0,001	0,060	0,001	0,033	0,004	
I2[A]	0,243	0,002	0,109	0,004	0,005	0,001	0,060	0,003	0,032	0,003	
I3[A]	0,249	0,001	0,103	0,004	0,005	0,001	0,061	0,001	0,032	0,003	
I4[A]	0,004	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,004	0,000	

○ *Hodnoty vstupních/výstupních harmonických se vstupním filtrem (15Nm)*

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	
U1[V]	215,170	0,033	9,236	0,065	8,003	0,050	1,375	0,013	0,021	0,010	filtr_menic_15_20_025
U2[V]	215,321	0,033	9,268	0,065	7,968	0,049	1,329	0,013	0,016	0,009	
U3[V]	214,533	0,026	9,132	0,051	5,942	0,045	6,117	0,020	0,135	0,018	
U4[V]	136,501	0,030	0,019	0,099	0,037	0,119	0,006	0,002	0,035	0,021	
I1[A]	1,570	0,008	0,057	0,002	1,168	0,002	0,882	0,007	0,014	0,003	
I2[A]	1,618	0,005	0,065	0,003	1,197	0,004	0,894	0,004	0,013	0,002	
I3[A]	1,601	0,005	0,066	0,002	1,186	0,006	0,885	0,005	0,011	0,003	
I4[A]	3,446	0,001	0,001	0,005	0,001	0,005	0,000	0,000	0,001	0,002	
U1[V]	216,081	0,034	9,975	0,039	8,454	0,038	1,437	0,010	0,076	0,011	filtr_menic_15_20_080
U2[V]	216,229	0,033	10,009	0,040	8,420	0,036	1,390	0,010	0,082	0,012	
U3[V]	215,434	0,025	9,848	0,033	6,636	0,038	6,054	0,006	0,192	0,010	
U4[V]	122,713	0,019	0,011	0,072	0,182	0,055	0,031	0,006	0,028	0,018	
I1[A]	1,535	0,012	0,033	0,005	1,155	0,006	0,844	0,005	0,026	0,003	
I2[A]	1,617	0,004	0,045	0,004	1,213	0,011	0,884	0,002	0,020	0,002	
I3[A]	1,575	0,003	0,045	0,004	1,182	0,018	0,856	0,001	0,030	0,002	
I4[A]	3,804	0,003	0,000	0,004	0,003	0,003	0,000	0,001	0,000	0,000	
U1[V]	215,357	0,046	10,424	0,017	8,396	0,025	1,584	0,004	0,072	0,018	filtr_menic_15_20_160
U2[V]	215,486	0,045	10,457	0,016	8,355	0,024	1,526	0,003	0,076	0,018	
U3[V]	214,520	0,048	10,295	0,018	6,863	0,006	6,562	0,003	0,194	0,016	
U4[V]	96,160	0,045	0,079	0,100	1,427	0,102	0,806	0,015	0,032	0,185	
I1[A]	1,760	0,035	0,032	0,028	1,268	0,015	0,884	0,004	0,023	0,004	
I2[A]	1,934	0,014	0,046	0,013	1,397	0,025	0,971	0,005	0,029	0,006	
I3[A]	1,869	0,020	0,052	0,005	1,322	0,012	0,918	0,010	0,033	0,008	
I4[A]	3,975	0,034	0,019	0,017	0,040	0,007	0,004	0,002	0,006	0,001	
U1[V]	216,181	0,023	10,409	0,020	8,458	0,001	1,264	0,020	0,166	0,010	filtr_menic_15_35_025
U2[V]	216,282	0,022	10,439	0,019	8,403	0,002	1,199	0,019	0,161	0,008	
U3[V]	215,233	0,009	10,430	0,015	6,492	0,010	7,818	0,020	0,299	0,010	
U4[V]	243,195	0,025	0,007	0,004	0,020	0,001	0,000	0,003	0,004	0,001	
I1[A]	2,280	0,003	0,017	0,003	1,606	0,005	1,114	0,003	0,028	0,001	
I2[A]	2,338	0,002	0,007	0,002	1,645	0,003	1,132	0,001	0,027	0,001	
I3[A]	2,304	0,005	0,007	0,004	1,623	0,002	1,117	0,002	0,026	0,001	
I4[A]	3,339	0,002	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	
U1[V]	216,100	0,029	10,650	0,037	9,732	0,030	1,684	0,014	0,222	0,012	filtr_menic_15_35_080
U2[V]	216,204	0,030	10,681	0,038	9,682	0,029	1,630	0,014	0,232	0,012	
U3[V]	215,194	0,017	10,825	0,023	7,637	0,038	7,543	0,017	0,449	0,015	
U4[V]	243,401	0,067	0,015	0,011	0,026	0,002	0,023	0,004	0,003	0,003	
I1[A]	2,147	0,012	0,072	0,009	1,535	0,004	1,080	0,004	0,024	0,005	
I2[A]	2,253	0,007	0,063	0,005	1,609	0,012	1,130	0,004	0,029	0,002	
I3[A]	2,168	0,004	0,063	0,004	1,560	0,010	1,092	0,003	0,028	0,001	
I4[A]	3,461	0,002	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	215,794	0,024	10,207	0,008	8,426	0,018	1,375	0,018	0,160	0,009	filtr_menic_15_35_160
U2[V]	215,893	0,024	10,236	0,008	8,362	0,017	1,313	0,018	0,155	0,008	
U3[V]	214,782	0,015	10,279	0,003	5,756	0,015	8,419	0,009	0,209	0,006	
U4[V]	236,744	0,069	0,028	0,026	0,165	0,013	0,065	0,018	0,005	0,005	
I1[A]	2,178	0,019	0,035	0,010	1,500	0,004	1,047	0,007	0,016	0,010	
I2[A]	2,348	0,005	0,024	0,008	1,631	0,018	1,132	0,003	0,026	0,001	
I3[A]	2,181	0,007	0,021	0,009	1,518	0,019	1,062	0,003	0,024	0,003	
I4[A]	3,580	0,004	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	
U1[V]	215,832	0,034	10,343	0,008	9,029	0,008	1,129	0,028	0,074	0,015	filtr_menic_15_50_025
U2[V]	215,923	0,034	10,371	0,009	8,957	0,007	1,057	0,027	0,069	0,016	
U3[V]	214,541	0,042	10,318	0,029	7,122	0,033	9,265	0,005	0,431	0,023	
U4[V]	368,733	0,125	0,161	0,074	21,699	0,052	3,241	0,033	0,022	0,018	
I1[A]	3,030	0,054	0,005	0,057	2,031	0,009	1,313	0,007	0,036	0,006	
I2[A]	3,051	0,040	0,009	0,039	2,071	0,006	1,327	0,002	0,038	0,005	
I3[A]	3,061	0,067	0,054	0,066	2,041	0,013	1,320	0,004	0,037	0,005	
I4[A]	3,797	0,002	0,003	0,002	0,187	0,001	0,052	0,000	0,000	0,001	
U1[V]	215,529	0,082	10,405	0,010	9,348	0,038	1,062	0,043	0,061	0,021	filtr_menic_15_50_080
U2[V]	215,612	0,081	10,435	0,011	9,279	0,037	0,996	0,043	0,070	0,020	
U3[V]	214,237	0,082	10,498	0,017	7,325	0,032	9,275	0,036	0,425	0,010	
U4[V]	368,698	0,157	0,104	0,078	22,975	0,017	2,106	0,031	0,028	0,017	
I1[A]	3,032	0,059	0,025	0,055	2,024	0,011	1,307	0,003	0,038	0,004	
I2[A]	3,093	0,034	0,026	0,032	2,064	0,004	1,318	0,002	0,036	0,004	
I3[A]	3,034	0,068	0,030	0,057	2,030	0,022	1,307	0,003	0,033	0,006	
I4[A]	3,802	0,004	0,002	0,002	0,204	0,001	0,041	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	215,173	0,023	10,196	0,019	8,902	0,023	1,175	0,021	0,045	0,007	filtr_menic_15_50_160
U2[V]	215,263	0,021	10,226	0,019	8,826	0,022	1,101	0,022	0,042	0,007	
U3[V]	213,830	0,007	10,055	0,010	6,804	0,022	9,644	0,009	0,409	0,012	
U4[V]	368,036	0,146	0,295	0,045	22,029	0,017	3,046	0,015	0,047	0,006	
I1[A]	3,068	0,054	0,038	0,049	2,072	0,001	1,348	0,002	0,038	0,003	
I2[A]	3,100	0,043	0,053	0,036	2,103	0,001	1,357	0,002	0,034	0,003	
I3[A]	3,090	0,065	0,109	0,058	2,082	0,012	1,340	0,001	0,032	0,002	
I4[A]	3,820	0,002	0,005	0,002	0,195	0,001	0,031	0,000	0,000	0,000	



○ *Hodnoty vstupních/výstupních harmonických se vstupním filtrem (15Nm)*

	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	
U1[V]	0,084	0,007	0,686	0,001	0,084	0,004	0,054	0,002	0,142	0,000	filtr_menic_15_20_025
U2[V]	0,073	0,007	0,680	0,002	0,089	0,002	0,049	0,002	0,155	0,004	
U3[V]	3,751	0,009	1,990	0,011	0,270	0,009	2,040	0,005	1,849	0,016	
U4[V]	0,034	0,002	0,004	0,419	0,020	0,435	0,004	0,003	0,012	0,008	
I1[A]	0,312	0,003	0,137	0,002	0,020	0,003	0,106	0,003	0,079	0,001	
I2[A]	0,315	0,000	0,140	0,001	0,021	0,000	0,107	0,001	0,077	0,000	
I3[A]	0,313	0,001	0,137	0,001	0,021	0,001	0,106	0,002	0,077	0,001	
I4[A]	0,001	0,001	0,000	0,005	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,178	0,005	0,696	0,003	0,095	0,002	0,118	0,003	0,169	0,001	filtr_menic_15_20_080
U2[V]	0,159	0,005	0,689	0,003	0,104	0,002	0,119	0,004	0,181	0,002	
U3[V]	3,880	0,004	1,943	0,002	0,304	0,004	2,139	0,006	1,786	0,006	
U4[V]	0,025	0,009	0,006	0,414	0,020	0,403	0,005	0,011	0,008	0,015	
I1[A]	0,320	0,002	0,133	0,003	0,019	0,001	0,103	0,003	0,071	0,006	
I2[A]	0,327	0,002	0,141	0,001	0,023	0,001	0,106	0,004	0,072	0,002	
I3[A]	0,319	0,006	0,138	0,002	0,021	0,001	0,103	0,000	0,071	0,005	
I4[A]	0,000	0,001	0,000	0,005	0,000	0,013	0,000	0,008	0,000	0,000	
U1[V]	0,258	0,005	0,696	0,002	0,128	0,002	0,089	0,002	0,118	0,001	filtr_menic_15_20_160
U2[V]	0,240	0,004	0,696	0,002	0,136	0,002	0,098	0,002	0,126	0,001	
U3[V]	3,573	0,025	2,121	0,016	0,260	0,018	2,150	0,024	1,512	0,014	
U4[V]	0,309	0,144	0,223	0,298	0,042	0,424	0,099	0,140	0,073	0,049	
I1[A]	0,281	0,007	0,120	0,010	0,023	0,010	0,099	0,007	0,065	0,004	
I2[A]	0,307	0,008	0,126	0,005	0,014	0,006	0,106	0,003	0,064	0,003	
I3[A]	0,294	0,005	0,117	0,011	0,025	0,003	0,101	0,003	0,064	0,005	
I4[A]	0,003	0,003	0,000	0,006	0,003	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001	
U1[V]	0,370	0,009	0,654	0,001	0,108	0,004	0,086	0,002	0,165	0,003	filtr_menic_15_35_025
U2[V]	0,353	0,009	0,658	0,003	0,123	0,003	0,096	0,001	0,169	0,002	
U3[V]	3,389	0,005	2,390	0,012	0,285	0,008	2,392	0,007	1,590	0,003	
U4[V]	0,000	0,000	0,002	0,002	0,001	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	
I1[A]	0,298	0,005	0,135	0,000	0,017	0,003	0,120	0,002	0,071	0,002	
I2[A]	0,303	0,001	0,134	0,000	0,019	0,002	0,119	0,001	0,072	0,001	
I3[A]	0,299	0,002	0,131	0,001	0,018	0,002	0,118	0,001	0,071	0,001	
I4[A]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,269	0,007	0,960	0,003	0,092	0,003	0,173	0,004	0,138	0,002	filtr_menic_15_35_080
U2[V]	0,257	0,008	0,965	0,003	0,102	0,003	0,184	0,004	0,143	0,003	
U3[V]	3,707	0,016	2,534	0,008	0,412	0,010	2,586	0,012	1,802	0,013	
U4[V]	0,002	0,003	0,001	0,002	0,006	0,003	0,004	0,002	0,005	0,002	
I1[A]	0,303	0,009	0,131	0,003	0,018	0,002	0,124	0,006	0,078	0,003	
I2[A]	0,314	0,002	0,133	0,002	0,018	0,002	0,124	0,001	0,081	0,000	
I3[A]	0,306	0,001	0,127	0,002	0,018	0,001	0,123	0,003	0,080	0,000	
I4[A]	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,480	0,006	0,595	0,002	0,108	0,002	0,123	0,004	0,159	0,000	filtr_menic_15_35_160
U2[V]	0,469	0,006	0,599	0,002	0,120	0,001	0,135	0,004	0,162	0,001	
U3[V]	3,413	0,014	2,604	0,008	0,172	0,005	2,545	0,005	1,799	0,010	
U4[V]	0,014	0,007	0,014	0,004	0,002	0,003	0,005	0,010	0,004	0,003	
I1[A]	0,267	0,013	0,135	0,008	0,015	0,003	0,117	0,011	0,071	0,005	
I2[A]	0,289	0,004	0,142	0,004	0,009	0,002	0,121	0,006	0,077	0,001	
I3[A]	0,275	0,007	0,129	0,007	0,009	0,000	0,117	0,006	0,076	0,006	
I4[A]	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
U1[V]	0,466	0,015	0,617	0,006	0,106	0,006	0,129	0,005	0,131	0,003	filtr_menic_15_50_025
U2[V]	0,453	0,015	0,629	0,006	0,119	0,006	0,138	0,005	0,129	0,003	
U3[V]	3,128	0,029	3,024	0,008	0,407	0,016	2,442	0,022	1,396	0,009	
U4[V]	0,303	0,008	0,486	0,009	0,019	0,008	1,574	0,004	1,255	0,007	
I1[A]	0,291	0,002	0,165	0,007	0,023	0,005	0,127	0,001	0,067	0,003	
I2[A]	0,294	0,001	0,160	0,003	0,022	0,002	0,124	0,001	0,069	0,001	
I3[A]	0,294	0,003	0,159	0,005	0,023	0,001	0,125	0,002	0,067	0,004	
I4[A]	0,007	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,004	0,000	
U1[V]	0,400	0,019	0,630	0,007	0,112	0,006	0,055	0,007	0,092	0,006	filtr_menic_15_50_080
U2[V]	0,387	0,020	0,641	0,007	0,123	0,007	0,065	0,007	0,090	0,006	
U3[V]	2,982	0,014	2,807	0,011	0,378	0,003	2,114	0,009	1,211	0,011	
U4[V]	0,437	0,006	0,484	0,007	0,006	0,015	1,462	0,008	1,173	0,004	
I1[A]	0,274	0,003	0,152	0,004	0,017	0,002	0,109	0,002	0,057	0,003	
I2[A]	0,277	0,002	0,146	0,003	0,017	0,000	0,108	0,000	0,059	0,002	
I3[A]	0,274	0,002	0,146	0,005	0,019	0,001	0,108	0,002	0,059	0,003	
I4[A]	0,006	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,004	0,000	
U1[V]	0,484	0,003	0,550	0,003	0,148	0,003	0,160	0,001	0,140	0,003	filtr_menic_15_50_160
U2[V]	0,472	0,003	0,561	0,003	0,163	0,003	0,173	0,001	0,135	0,003	
U3[V]	3,404	0,019	3,148	0,017	0,418	0,005	2,797	0,015	1,594	0,010	
U4[V]	0,420	0,003	0,445	0,008	0,011	0,012	1,473	0,011	1,210	0,007	
I1[A]	0,308	0,001	0,180	0,007	0,026	0,002	0,143	0,003	0,077	0,006	
I2[A]	0,310	0,001	0,175	0,002	0,026	0,000	0,140	0,001	0,078	0,002	
I3[A]	0,307	0,000	0,174	0,005	0,027	0,001	0,139	0,002	0,079	0,005	
I4[A]	0,006	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,004	0,000	

◦ *Hodnoty vypočtených výkonových parametrů*

Soubor č.	Uef1[V]	Uef2[V]	Uef3[V]	Uef4[V]	Ief1[A]	Ief2[A]	Ief3[A]	Ief4[A]	P1[W]	P2[W]	P3[W]	P4[W]
1	218,3			174,9	2,5			3,0	805,4			777,6
2	217,5			147,6	2,4			3,0	755,0			745,3
3	218,8			134,5	2,4			3,1	735,9			723,7
4	217,5			293,5	3,5			3,1	1172,8			1390,5
5	218,2			269,6	3,4			3,0	1113,8			1343,7
6	218,5			258,8	3,2			3,0	1049,0			1290,6
7	217,7			409,2	4,4			3,2	1574,9			2043,3
8	218,8			409,3	4,4			3,2	1573,2			2009,3
9	217,9			410,2	4,4			3,2	1556,8			2041,9
10	216,4			173,6	3,0			4,0	1002,2			1073,1
11	215,4			148,8	2,9			4,4	978,8			1133,8
12	217,6			118,8	3,6			6,3	1085,9			1275,1
13	216,2			292,0	4,2			3,8	1443,9			1772,6
14	215,0			267,1	4,0			3,8	1373,5			1742,9
15	215,8			255,5	3,8			3,9	1273,0			1716,3
16	215,7			404,9	5,6			3,8	2027,5			2520,5
17	216,1			406,3	5,5			3,8	2007,1			2518,5
18	214,7			402,9	5,6			3,8	2010,8			2488,9
19	217,6	217,8	217,3	174,6	1,5	1,6	1,5	3,0	665,0	677,2	669,1	781,7
20	218,3	218,5	218,0	147,9	1,5	1,6	1,6	3,0	687,7	700,3	693,0	749,2
21	219,2	219,5	219,0	135,8	1,6	1,7	1,7	3,1	691,9	714,3	714,1	725,2
22	217,8	218,0	217,3	293,0	2,3	2,3	2,3	3,1	1053,2	1068,5	1057,9	1399,9
23	218,0	218,2	217,5	270,0	2,2	2,3	2,3	3,1	1042,0	1055,4	1050,9	1352,6
24	218,9	219,1	218,4	259,5	2,1	2,3	2,2	3,0	1004,8	1026,9	1022,9	1299,2
25	217,7	217,8	217,0	389,4	2,9	3,0	3,0	3,1	1429,8	1435,4	1429,9	1882,5
26	217,9	218,1	217,2	390,2	3,0	3,1	3,0	3,1	1459,7	1470,0	1456,3	1886,0
27	218,2	218,4	217,6	390,6	3,0	3,1	3,1	3,1	1487,5	1525,7	1499,1	1888,1
28	215,5	215,7	215,0	176,3	2,2	2,3	2,3	4,0	1027,6	1035,8	1021,9	1083,7
29	216,5	216,6	215,9	142,4	2,2	2,3	2,2	4,4	1010,5	1041,7	1012,6	1081,9
30	215,9	216,1	215,2	129,4	2,5	2,7	2,6	5,6	1141,0	1239,7	1174,1	1232,4
31	216,7	216,8	215,9	290,7	3,1	3,1	3,1	3,8	1484,7	1497,7	1470,6	1770,8
32	216,6	216,7	215,8	268,4	2,9	3,0	2,9	3,8	1403,5	1449,4	1390,5	1747,4
33	216,2	216,3	215,4	258,1	2,9	3,1	2,9	3,9	1411,4	1497,2	1384,3	1730,2
34	216,3	216,4	215,3	381,0	3,9	4,0	4,0	3,8	1952,8	1936,7	1934,6	2409,4
35	216,2	216,3	215,2	380,8	3,9	4,0	3,9	3,8	1958,6	1973,1	1925,7	2413,5
36	215,6	215,7	214,5	380,2	4,0	4,0	4,0	3,8	1964,6	1956,5	1939,0	2420,4

◦ *Hodnoty vypočtených výkonových parametrů*

Soubor č.	S1[VA]	S2[VA]	S3[VA]	S4[VA]	Q1[VAr]	Q2[VAr]	Q3[VAr]	Q4[VAr]	$\lambda_1[-]$	$\lambda_2[-]$	$\lambda_3[-]$	$\lambda_4[-]$
1	1658,0			897,0	1449,2			447,0	0,49			0,87
2	1558,6			756,5	1363,6			129,9	0,48			0,99
3	1593,9			726,8	1413,9			66,7	0,46			1,00
4	2275,7			1571,5	1950,3			732,1	0,52			0,88
5	2247,3			1418,4	1951,8			454,4	0,50			0,95
6	2099,4			1342,3	1818,6			369,0	0,50			0,96
7	2873,7			2296,1	2403,7			1047,5	0,55			0,89
8	2890,6			2252,2	2425,1			1017,3	0,54			0,89
9	2879,4			2297,0	2422,3			1052,0	0,54			0,89
10	1971,2			1208,8	1697,4			556,5	0,51			0,89
11	1894,6			1134,5	1622,2			40,4	0,52			1,00
12	2380,5			1291,3	2118,4			204,1	0,46			0,99
13	2746,6			1912,3	2336,5			717,5	0,53			0,93
14	2585,8			1764,3	2190,9			274,4	0,53			0,99
15	2433,7			1727,7	2074,2			198,3	0,52			0,99
16	3650,4			2672,6	3035,6			888,7	0,56			0,94
17	3596,4			2675,9	2984,2			904,2	0,56			0,94
18	3576,2			2636,2	2957,4			869,0	0,56			0,94
19	1011,6	1025,2	1008,8	899,8	762,3	769,7	755,0	445,7	0,66	0,66	0,66	0,87
20	1003,8	1062,6	1044,6	761,5	731,2	799,2	781,7	136,2	0,69	0,66	0,66	0,98
21	1028,8	1142,1	1119,2	729,1	761,4	891,2	861,7	74,5	0,67	0,63	0,64	0,99
22	1478,5	1514,9	1500,1	1577,7	1037,6	1073,8	1063,5	727,7	0,71	0,71	0,71	0,89
23	1440,7	1494,4	1484,8	1429,0	994,9	1058,0	1048,9	461,0	0,72	0,71	0,71	0,95
24	1394,6	1491,6	1469,9	1352,8	967,2	1081,8	1055,6	377,2	0,72	0,69	0,70	0,96
25	1926,2	1967,2	1955,0	2069,2	1290,7	1345,3	1333,2	858,9	0,74	0,73	0,73	0,91
26	1956,3	2012,9	1986,5	2069,3	1302,5	1375,1	1351,1	851,5	0,75	0,73	0,73	0,91
27	1980,1	2046,8	2018,2	2068,9	1306,9	1364,4	1351,2	845,9	0,75	0,75	0,74	0,91
28	1446,9	1464,2	1452,5	1214,0	1018,5	1034,8	1032,2	547,3	0,71	0,71	0,70	0,89
29	1397,2	1464,3	1429,2	1082,4	964,9	1029,1	1008,6	31,9	0,72	0,71	0,71	1,00
30	1596,8	1722,1	1673,0	1261,5	1117,1	1195,3	1191,8	269,5	0,71	0,72	0,70	0,98
31	1986,2	2026,0	1996,7	1902,3	1319,3	1364,4	1350,6	695,0	0,75	0,74	0,74	0,93
32	1877,3	1967,4	1896,9	1772,1	1246,7	1330,5	1290,3	295,2	0,75	0,74	0,73	0,99
33	1876,0	2025,1	1895,9	1745,4	1235,9	1363,6	1295,5	229,7	0,75	0,74	0,73	0,99
34	2545,3	2571,4	2553,9	2521,9	1632,6	1691,5	1667,3	745,0	0,77	0,75	0,76	0,96
35	2556,2	2600,7	2547,7	2525,9	1642,5	1694,3	1668,0	744,9	0,77	0,76	0,76	0,96
36	2566,3	2593,8	2566,6	2534,0	1651,1	1703,0	1681,5	750,2	0,77	0,75	0,76	0,96

◦ *Hodnoty vypočtených výkonových parametrů*

Soubor č.	THD U1[-]	THD U2[-]	THD U3[-]	THD U4[-]	THD I1[-]	THD I2[-]	THD I3[-]	THD I4[-]	CF I1[-]	CF I2[-]	CF I3[-]	CF I4[-]
1	0,05			0,52	1,86			0,05	3,88			1,49
2	0,05			0,09	1,89			0,08	3,87			1,41
3	0,05			0,06	1,99			0,06	4,33			1,43
4	0,06			0,68	1,73			0,55	3,62			1,49
5	0,06			0,52	1,82			0,52	5,08			1,49
6	0,06			0,58	1,80			0,58	3,86			1,45
7	0,06			0,26	1,58			0,13	3,34			1,46
8	0,06			0,26	1,60			0,13	3,32			1,48
9	0,06			0,26	1,62			0,12	3,44			1,47
10	0,06			0,52	1,75			0,06	3,76			1,43
11	0,06			0,61	1,73			0,61	3,59			1,44
12	0,06			0,90	1,82			0,84	3,72			1,32
13	0,06			0,72	1,69			0,59	3,37			1,48
14	0,06			0,62	1,66			0,62	3,37			1,45
15	0,06			0,56	1,68			0,56	3,29			1,44
16	0,06			0,28	1,56			0,16	3,28			1,47
17	0,07			0,28	1,55			0,16	3,28			1,47
18	0,07			0,28	1,52			0,16	3,16			1,47
19	0,07	0,07	0,08	0,52	1,20	1,14	1,12	0,07	3,13	3,05	2,94	1,47
20	0,07	0,07	0,07	0,09	1,11	1,14	1,11	0,09	3,03	2,99	2,88	1,41
21	0,06	0,06	0,07	0,09	1,15	1,27	1,22	0,08	3,02	3,11	3,26	1,42
22	0,07	0,07	0,08	0,62	1,01	0,99	0,99	0,49	2,62	2,77	2,53	1,50
23	0,07	0,07	0,08	0,56	0,98	1,00	0,99	0,56	2,56	2,71	2,51	1,45
24	0,07	0,07	0,07	0,62	0,99	1,05	1,02	0,62	3,24	3,17	3,11	1,45
25	0,07	0,07	0,08	0,25	0,91	0,91	0,91	0,12	2,31	2,30	2,29	1,47
26	0,07	0,07	0,08	0,26	0,90	0,91	0,91	0,13	2,26	2,36	2,33	1,46
27	0,08	0,08	0,09	0,26	0,88	0,87	0,88	0,13	2,20	2,33	2,24	1,45
28	0,05	0,05	0,06	0,82	1,02	0,98	1,00	0,57	2,84	2,67	2,89	1,48
29	0,06	0,06	0,07	0,59	0,98	0,97	0,98	0,57	2,54	2,44	2,55	1,42
30	0,07	0,07	0,08	0,90	0,97	0,93	0,96	1,00	2,73	2,67	2,61	1,50
31	0,06	0,06	0,08	0,65	0,89	0,88	0,89	0,53	2,39	2,19	2,41	1,49
32	0,07	0,07	0,08	0,46	0,90	0,90	0,91	0,46	2,35	2,27	2,42	1,43
33	0,06	0,06	0,07	0,43	0,87	0,88	0,90	0,43	2,45	2,40	2,44	1,44
34	0,07	0,07	0,08	0,26	0,82	0,83	0,82	0,11	2,20	2,10	2,21	1,49
35	0,06	0,06	0,08	0,26	0,83	0,82	0,83	0,12	2,21	2,12	2,14	1,48
36	0,06	0,06	0,08	0,26	0,82	0,82	0,82	0,12	2,14	2,09	2,20	1,47